



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

JADERNÉ ELEKTRÁRNY

NUCLEAR POWER PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Musil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: Jiří Musil
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Jaderné elektrárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci práce bude zpracována rešerše z oblasti typů užívaných jaderných reaktorů a jejich vývoje. Popsány budou jaderné elektrárny provozované v ČR. Dále budou představeny trendy a vývojové směry v jaderné energetice.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršní formou zpracovat přehled typů užívaných jaderných reaktorů a využívaných paliv.
2. Popis jaderných elektráren v ČR.
3. Uvést trendy a výhledy jaderných zdrojů.

Seznam doporučené literatury:

BRUNČIAKOVÁ, Miriama. 2013. Jaderné reaktory pro novou výstavbu v České republice.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje historii i budoucnosti jaderných reaktorů, popisu jaderných elektráren v České republice a také slibným zdrojům energie z jádra, které jsou nyní ve vývoji. Je doplněna o podrobnější popis sekundárního okruhu českých jaderných elektráren, který je s výrobou elektrické energie v nich neoddělitelně spojen. Na začátku práce jsou pro čtenáře stručně shrnuty některé základní poznatky z jaderné energetiky, které si kladou za cíl uvést ho do problematiky.

Abstract

This bachelor's thesis deals with history and future of nuclear reactors, it describes nuclear power plants in the Czech Republic and provides a list of promising possibilities of using nuclear energy, that are currently in research. Description of the secondary circuit based on Czech nuclear power plants is also included in this thesis. In the beginning, some elementary knowledge about nuclear energetics is gathered, to provide readers with basics of this topic.

Klíčová slova

Jaderná energetika, jaderné reaktory, Dukovany, Temelín, sekundární okruh, jaderná fúze.

Key words

Nuclear energetics, nuclear reactors, Dukovany, Temelin, secondary circuit, nuclear fusion.

Bibliografická citace

MUSIL, J. *Jaderné elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Jaderné elektrárny* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D. s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 17. 5. 2017

.....

Jiří Musil

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné připomínky při jejím psaní.

Obsah

Úvod.....	11
Jaderná energetika	12
1 Jaderné reaktory.....	15
1.1 Minulost reaktorů	15
1.1.1 Přírodní reaktor	15
1.1.2 První jaderný reaktor	15
1.1.3 První jaderné elektrárny	16
1.2 Reaktory I. generace	17
1.2.1 Lehkovodní tlakový množivý reaktor PLWBR	17
1.2.2 Magnox GCR	17
1.2.3 Experimentální varný reaktor EBWR	17
1.2.4 Elektrárna Jaslovské Bohunice	17
1.3 Reaktory II. generace	18
1.3.1 Tlakovodní reaktor PWR, VVER	18
1.3.2 Varný reaktor BWR	19
1.3.3 Těžkovodní reaktor PHWR, CANDU	20
1.3.4 Plynem chlazený reaktor GCR, Magnox, AGR	21
1.3.5 Reaktor typu RBMK	22
1.3.6 Reaktor štěpící rychlými neutrony FR	23
1.4 Reaktory III. generace	25
1.4.1 Vylepšený varný reaktor ABWR.....	25
1.4.2 CANDU 6	25
1.4.3 VVER-1200	25
1.5 Reaktory generace III+	25
1.5.1 Francouzsko-německý EPR	25
1.5.2 Americký tlakovodní reaktor AP1000.....	26
1.5.3 Kanadský pokročilý reaktor CANDU ACR-1000	26
1.5.4 Lehkovodní varný reaktor ESBWR	26
1.6 Zhodnocení jaderných reaktorů	26
2 Jaderné elektrárny v České republice.....	27
2.1 Dukovany	28

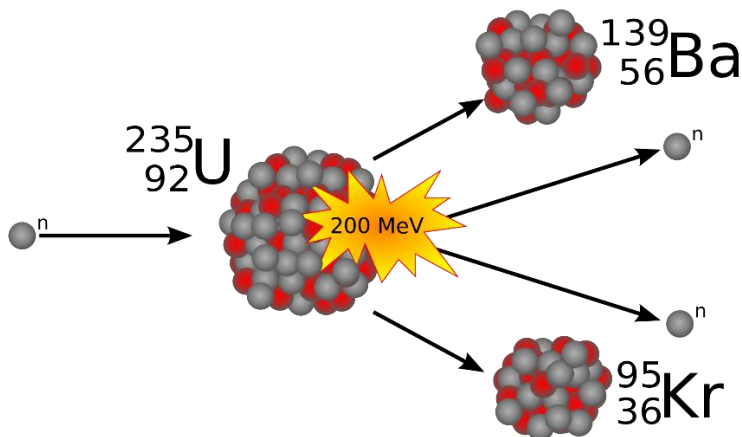
2.2 Temelín	31
2.3 Sekundární okruh jaderné elektrárny	34
2.4 Budoucnost jaderné energetiky v České republice	37
2.5 Zhodnocení české jaderné energetiky	38
3 Budoucnost jaderné energetiky	39
3.1 Reaktory IV. generace	39
3.1.1 Vysokoteplotní reaktory HTGR	39
3.1.2 Reaktory využívající vodu v superkritické fázi SCWR	40
3.1.3 Olovem chlazené rychlé reaktory LFR.....	40
3.1.4 Reaktory založené na roztavených solích MSR	41
3.1.5 Rychlé reaktory chlazené plynem GFR.....	41
3.1.6 Sodíkem chlazené rychlé reaktory SFR	41
3.2 Termojaderná fúze	41
3.3 Transmutace radioaktivního odpadu	42
3.3.1 Technologie ADS	42
3.3.2 Technologie MSR.....	42
3.4 Thoriový cyklus	43
3.5 Malé modulární reaktory	43
3.5 Zhodnocení budoucnosti jaderné energetiky	45
Závěr.....	46
Seznam použitých zdrojů	47
Seznam použitých zkratk a symbolů	52
Seznam obrázků a tabulek	53

Úvod

Jaderná energetika se v posledních několika desetiletích stala velmi významnou součástí našeho světa. Vědecké snahy o využití energie uzavřené v atomu započaly koncem 19. století, na počátku stály osobnosti jako Henri Becquerel nebo Wilhelm Conrad Röntgen. Během následujících let se vědcům podařilo pomocí experimentů prohloubit naše znalosti o struktuře atomu a jeho základních částech – elektronech, protonech a neutronech. Před druhou světovou válkou došlo v německých laboratořích k objevu, že štěpením jader těžkých prvků je možné uvolňovat energii, která tato jádra držela dohromady. Od této doby se datuje zvýšené úsilí vědců a výzkumníků porozumět tomuto štěpení a využít vznikající energii k vojenským účelům. Po konci druhé světové války se začalo rozvíjet i mírové využití jaderné energie, které v současnosti převládá.

Jaderná energetika

V jaderné energetice je nejčastěji štěpitelným prvkem uran, konkrétně jeho izotop ^{235}U . Při štěpení jádra ^{235}U neutronem dochází k zaškrvení jádra a jeho rozpadu na dvě přibližně stejně velké části (viz Obr. 1). Ty se vzájemně odpuzují a rozletí se od sebe velkou rychlostí. Dojde také k uvolnění dvou nebo tří rychlých neutronů. Zpomalením obou nově vzniklých jader okolním prostředím se jejich kinetická energie přemění na tepelnou. Tato tepelná energie je poté využita, většinou k výrobě elektrické energie. [1], [2]



Obr. 1 Jeden z možných výsledků štěpení jádra uranu neutronem [3]

Jaderná energetika ve světě

K 1. březnu 2017 je ve světě v provozu 447 reaktorů o celkovém elektrickém výkonu téměř 400 GWe. Největší počet reaktorů na světě se nachází v USA – celkem 99¹. Disponují celkovým elektrickým výkonem téměř 100 GWe. V roce 2015 zde pocházelo z jádra 20 % elektrické energie. Největší podíl elektrické energie z jaderných zdrojů – více než 75 % – má Francie. Všech jejích 58 reaktorů je tlakovodního typu. Francie je největším světovým exportérem elektrické energie². Zemí s třetím největším instalovaným výkonem z jaderných elektráren je Japonsko, které má v současnosti k dispozici 42 reaktorů. V zemi probíhá diskuse o dalším využití jádra, způsobená neštěstím ve Fukušimě v roce 2011³. Rozmach zažívá jaderná energetika v rozvojových zemích, jako je Indie nebo Čína. Zde jsou do budoucna naplánovány stavby desítek nových reaktorů. [4]

Ve 21. století se staví méně reaktorů než ve století 20., dochází ale k neustálému zlepšování provozních parametrů u starších jaderných elektráren. Celkový instalovaný výkon jaderných elektráren ve světě tedy stoupá. Stále více reaktorů také splňuje podmínky pro prodloužení životnosti, v některých případech až na 60 let. [5]

Hlavní výhodou jaderných elektráren je skutečnost, že na rozdíl od uhelných elektráren nevypouštějí do ovzduší žádný oxid uhličitý, čímž nepřispívají ke skleníkovému efektu. Ve prospěch jaderných elektráren při srovnání s větrnými a slunečními elektrárnami mluví nemožnost regulace výkonu u těchto obnovitelných zdrojů – jsou nutné záložní zdroje energie.

¹ USA vlastní 65 tlakovodních reaktorů PWR a 34 varných reaktorů BWR. [6]

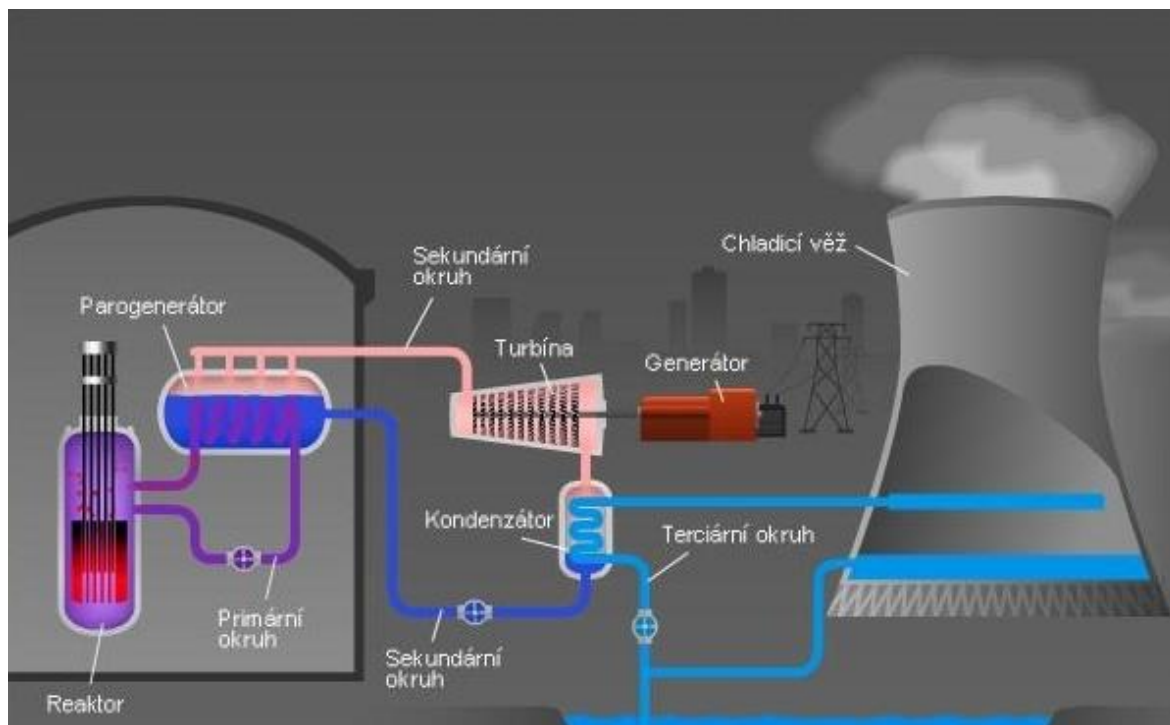
² Zásobuje například Itálii, Velkou Británii nebo Švýcarsko. [7]

³ Mezi roky 2013 a 2015 byly všechny reaktory odstaveny a jen velmi pomalu se vrací do provozu. [8]

Palivové náklady na výrobu elektřiny tvoří u jaderné elektrárny pouze malý zlomek celkových nákladů na výstavbu elektrárny a výrobu elektrické energie⁴. [9], [10]

Výroba elektřiny v jaderné elektrárně

Na Obr. 2 je uvedeno schéma jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem, který je ve světě nejrozšířenějším typem reaktorů. Následuje popis výroby elektřiny v těchto elektrárnách.



Obr. 2 Uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [11]

Srdcem jaderné elektrárny je **reaktor**, ve kterém probíhá řízené štěpení jader uranu přítomného v jaderném palivu. Při štěpné reakci se uvolňuje velké množství tepelné energie, které je odváděno chladivem, v tomto případě vodou⁵. Tato voda, cirkulující v primárním okruhu, předává svou tepelnou energii v tepelném výměníku (**parogenerátoru**) vodě sekundárního okruhu. Ta se mění v páru a je vedena na **turbínu**. Turbína roztáčí **generátor** elektrické energie, kde se mechanická energie mění na energii elektrickou. Pára vycházející z turbíny kondenzuje v **kondenzátoru** a ve formě vody se znovu vrací do parogenerátoru. V kondenzátoru je odváděno teplo pomocí chladicí vody terciárního okruhu, ta je poté ochlazována v **chladičích věžích**. (Text k Obr. 2) [11]

⁴ Celkové náklady na výrobu elektřiny tedy takřka nezávisí na kolísání cen uranu, například na rozdíl od plynových elektráren, kde je výrobní cena elektřiny na cenách plynu velmi závislá. [2]

⁵ Většinou demineralizovanou, která je až desetkrát čistější než voda destilovaná. [12]

Jaderné palivo

Uran do jaderného paliva se těží z uranové rudy. K největším těžbařům patří Kazachstán, Kanada a Austrálie. Po vytěžení a separaci čistého uranu dochází ve většině případů k jeho obohacování, tedy zvyšování obsahu izotopu ^{235}U na úkor ^{238}U , například pomocí centrifug. Nejčastěji je uranové palivo v reaktoru přítomné ve formě oxidů, nejrozšířenějším je UO_2 .

Při současném stavu využití paliva v klasických reaktorech by bez recyklace paliva vystačily zásoby uranu asi na 80 let⁶. V současnosti se tedy klade velký důraz na vývoj nových technologií, kterými by bylo možné použité palivo recyklovat a přepracovat.

V dnešní době jsou tři hlavní koncepce nakládání s použitým radioaktivním odpadem. První možností je jeho trvalé uložení do hlubinného úložiště, kdy tato dlouhodobá úložiště musí být zbudována v geologicky stabilní a neaktivní oblasti. Druhou alternativou je jeho okamžité přepracování na nové palivo – dnes se přepracovává přibližně 10 % použitého jaderného paliva. Nevýhodou přepracování je jeho velmi vysoká cena⁷. Třetí strategií, která je využívána momentálně i v ČR, je odložení rozhodnutí na pozdější dobu – očekává se, že v budoucnu se zefektivní a zlevní přepracování paliva nebo se objeví nové možnosti jeho dalšího využití. [5], [13]

S přepracováním použitého jaderného paliva souvisí relativně nově využívaný typ paliva – MOX. Jedná se o směs oxidů uranu a plutonia UO_2 a PuO_2 . Vzniká přepracováním použitého paliva, ze kterého je separováno plutonium, vzniklé v reaktoru neutronovými zachyty ^{238}U . Toto štěpitelné plutonium tvoří v palivu MOX relativně malý podíl (7-10 %), zbytek je tvořen ochuzeným uranem, vzniklým při procesu obohacování. Zajímavou možností je také využití zbraňového plutonia, které vyniká vysokým stupněm obohacení izotopy plutonia vhodnými ke štěpení. Palivo MOX je využíváno zejména v modernějších typech reaktorů, které jsou k jeho spalování uzpůsobeny⁸. [14]

⁶ Což se velmi neliší od zásob uhlí. [5]

⁷ V současnosti je levnější nákup nového paliva než recyklace starého. [13]

⁸ I v takovýchto reaktorech však tvoří palivo MOX obvykle jen přibližně třetinu palivové vsázky, zbylé dvě třetiny jsou zastoupeny klasickým uranovým palivem. [14]

1 Jaderné reaktory

V současnosti se ve světě nachází přibližně 450 jaderných reaktorů, které jsou využívány k výrobě elektrické energie. Existuje více typů reaktorů, které se liší například v konstrukci, použitém palivu nebo chladivu. Největší zastoupení mají reaktory tlakovodní, následované varnými a těžkovodními reaktory. *Tab. 1* shrnuje konkrétní čísla a podrobnosti jednotlivých typů reaktorů. [15]

Tab. 1 Přehled používaných reaktorů ke konci roku 2014 [15]

Typ reaktoru	Hlavní země	Počet reaktorů	Celkový výkon v GWe	Palivo	Chladivo	Moderátor ⁹
<i>Tlakovodní</i>	USA, Francie, Japonsko	277	257	Obohacený UO ₂	Voda	Voda
<i>Varný</i>	USA, Japonsko, Švédsko	80	75	Obohacený UO ₂	Voda	Voda
<i>Těžkovodní</i>	Kanada, Indie	49	25	Přírodní UO ₂	Těžká voda	Těžká voda
<i>Plynem chlazený</i>	Velká Británie	15	8	Přírodní a obohacený UO ₂	CO ₂	Grafit
<i>RBMK</i>	Rusko	15	10	Obohacený UO ₂	Voda	Grafit
<i>FBR</i>	Rusko	2	0,6	PuO ₂ a UO ₂	Sodík	-
Celkem		438	376			

1.1 Minulost reaktorů

1.1.1 Přírodní reaktor

Přibližně před dvěma miliardami let byl v africkém státě Gabun v lokalitě Oklo v činnosti přírodní reaktor, který byl tvořen tamějšími ložisky uranu, ve kterých se vyskytovala také voda. Došlo k zahájení štěpné reakce, která s přestávkami trvala několik tisíc let. Vědce na tento objev přivedl snížený obsah izotopu ²³⁵U v tamějších uranových dolech, který byl způsoben postupným štěpením tohoto izotopu v průběhu štěpné reakce¹⁰. [1], [16]

1.1.2 První jaderný reaktor

Za druhé světové války probíhal v USA projekt Manhattan, jehož hlavním cílem byla výroba první jaderné zbraně na světě. Součástí tohoto projektu bylo i postavení prvního funkčního jaderného reaktoru. Jednalo se o grafitem moderovaný reaktor, v němž se spaloval přírodní uran bez jakéhokoliv obohacení. Reaktor byl řízen tyčemi z kadmia. Na konci roku 1942

⁹ Látka, která zpomaluje neutrony. Pomalé neutrony mají větší pravděpodobnost štěpení jádra ²³⁵U. [15]

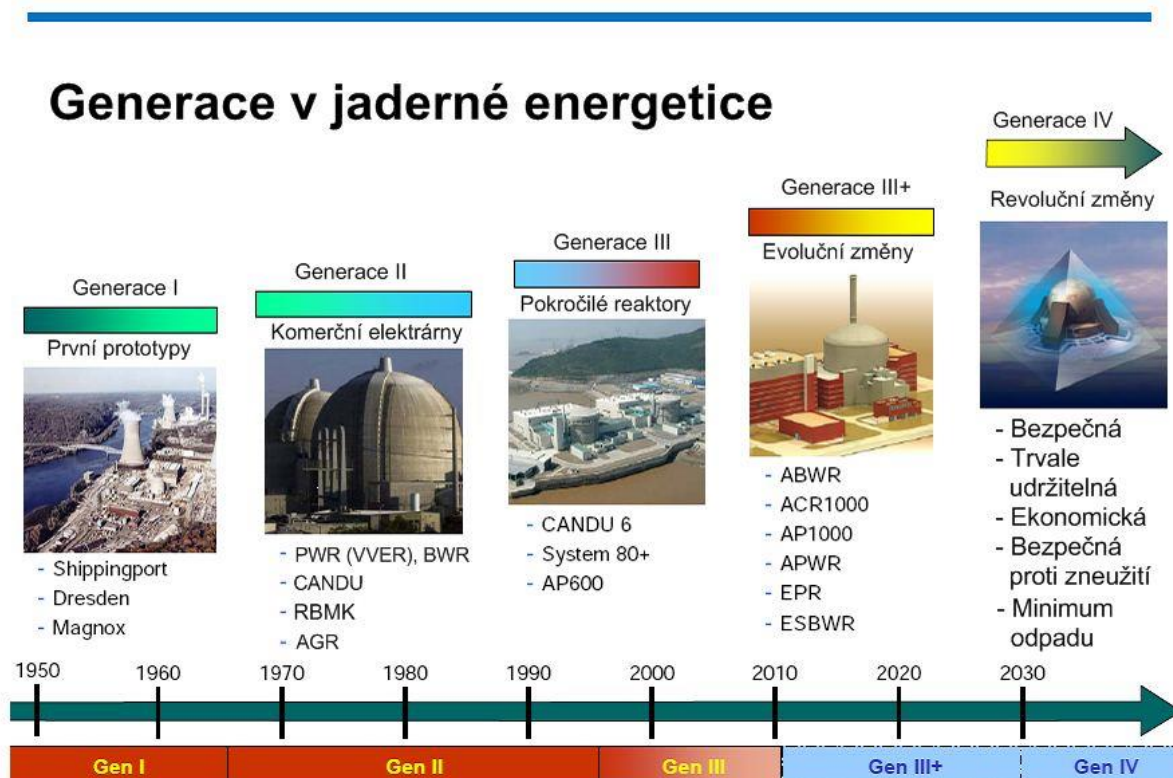
¹⁰ Všude na zemi je zastoupení izotopu ²³⁵U konstantní, a to 0,720 %, v Oklo je tato hodnota přibližně 0,717 %. [16]

se týmu pod vedením italského fyzika Enrica Fermiho podařilo poprvé spustit řízenou řetězovou štěpnou reakci, která trvala asi 30 minut, poté byl reaktor bezpečně odstaven. Reaktor dosahoval nepatrného výkonu – 0,5 W – ale byl jasným důkazem, že je možné za pomoci jaderného štěpení získávat energii. [17]

1.1.3 První jaderné elektrárny

Využití jaderné energie po druhé světové válce se stalo jednou z priorit mnoha zemí, proto už na počátku 50. let začaly reaktory vyrábět i elektrickou energii. Jednalo se však spíše o experimentální využití pro tyto účely. První jaderný reaktor, který skutečně dodával elektřinu do sítě, pochází z ruského města Obninsk. V roce 1954 zde byl postaven reaktor o tepelném výkonu 30 MWt, z nichž se na elektrický výkon přeměnilo 5 MW, dosahoval tedy účinnosti 17 %. Jednalo se o vodou chlazený a grafitem moderovaný reaktor kanálového typu, který se stal předchůdcem pozdějších reaktorů RBMK¹¹. [17]

V jaderné energetice jsou reaktory rozděleny do generací, zejména podle doby, ve které vznikaly. Historii i budoucnost jaderných reaktorů souhrnně popisuje Obr. 3.



Obr. 3 Přehled jednotlivých generací jaderných reaktorů [18]

¹¹ Po 5 letech provozu byla obninská elektrárna odpojena z elektrické sítě a až do roku 2002 sloužila jako výzkumný reaktor. V primárním okruhu byl tlak 10 MPa, v sekundárním 1,25 MPa. [19]

1.2 Reaktory I. generace

Vývoj a stavba probíhaly v 50. a 60. letech. Sloužily primárně k ověření, zda je možné efektivně využít jadernou energii k výrobě elektrické energie.

Reaktory první generace měly pouze základní bezpečnostní prvky, které byly s časem a přibývajících zkušenostmi vylepšovány. V prosinci 2015 byl odstaven poslední reaktor této generace v britské jaderné elektrárně Wylfa¹².

V Československu byl jediným použitým reaktorem této generace reaktor HWGCR – československý reaktor chlazený oxidem uhličitým a moderovaný těžkou vodou. Ten byl vystaven v první jaderné elektrárně na území Československa v Jaslovských Bohunicích. [20]

1.2.1 Lehkovodní tlakový množivý reaktor PLWBR

Disponoval výkonem až 60 MWe. Chlazení i moderování bylo zajišťováno lehkou vodou. Byl používán i jako pohon letadlových lodí. Jako množivý reaktor měl schopnost produkovat zbraňové plutonium. [18]

1.2.2 Magnox GCR

Používaly se hlavně v Japonsku a Velké Británii. Chlazení zajišťuje CO₂, moderátorem je grafit. [18]

1.2.3 Experimentální varný reaktor EBWR

Chladivem i moderátorem je obyčejná voda. V americké jaderné elektrárně Dresden dosahoval tento reaktor výkonu 200 MWe. [18]

1.2.4 Elektrárna Jaslovské Bohunice

Na konci 50. let zde byla zahájena stavba těžkovodního¹³ a oxidem uhličitým chlazeného reaktoru HWGCR, typu KS-150. Reaktor je sovětské konstrukce, vyráběl se kompletně v ČSR. Je to jediný komerčně využívaný reaktor svého druhu na světě. Dosahoval maximálního elektrického výkonu 127 MWe a elektřinu vyráběl od roku 1972. Elektrárnu po celý čas provozu stíhaly technické potíže. V roce 1977 došlo k částečnému roztavení aktivní zóny a reaktor musel být odstaven.

V Jaslovských Bohunicích byly později vybudovány dva bloky s reaktory VVER-440 V230 a dva bloky s modernizovanými VVER-440 V213. Zajímavé je, že od druhé poloviny 80. let je odpadní teplo z této elektrárny využíváno k zásobení několika měst, včetně okresní Trnavy. Po osamostatnění muselo Slovensko podléhat tlaku Rakouska a poté i Evropské Unie, což vedlo ke konečnému odstavení starších reaktorů V230 v letech 2006 a 2008, i když na nich bylo provedeno mnoho nákladných modernizací¹⁴. [21]

¹² Byl spuštěn v roce 1971 a měl instalovaný elektrický výkon 540 MWe. [20]

¹³ Těžká voda zde měla roli moderátoru. Díky tomu mohl být jako palivo využit přírodní uran bez obohacení. [21]

¹⁴ Odstavení těchto reaktorů bylo jednou z podmínek vstupu Slovenska do EU. [22]

1.3 Reaktory II. generace

Rozšíření začalo v 70. letech. Vyvinuly se z neúspěšnějších a nejspolehlivějších reaktorů 1. generace. V současnosti je většina využívaných reaktorů právě 2. generace. [18]

Intenzivní vývoj a velké finanční investice do této generace byly poháněny stoupajícími cenami ropy v 70. letech 20. století. Největší zastoupení získaly lehkovodní reaktory – PWR a BWR, zejména díky velké dostupnosti vody jako chladiva. Postupem času byly reaktory zdokonalovány, a to hlavně po bezpečnostní stránce, což bylo vždy primárně způsobeno některou havárií (Three Mile Island, Černobyl). Téměř za provozu byla také zvyšována životnost reaktorů z původně plánovaných 30-40 let až na dnešních 60 let. [20]

1.3.1 Tlakovodní reaktor PWR, VVER

Momentálně ve světě nejrozšířenější typ reaktorů. V současnosti je v provozu přes 270 těchto reaktorů, což představuje 62 % všech světových reaktorů. [17]

Reaktory byly vyvinuty jako zdroj energie pro americkou armádu a zejména námořnictvo. Byly používány například pro pohon jaderných ponorek¹⁵, s tímto je spojena firma Westinghouse. Později převzal tento koncept i Sovětský svaz, kde jsou tlakovodní reaktory známé pod zkratkou VVER. Právě typu VVER je všech šest reaktorů provozovaných v České republice, v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. [18]

Palivem je uran, obohacený na koncentraci izotopu ^{235}U kolem 3,5 - 5 %. Výměna paliva se provádí většinou každoročně, musí při ní dojít k odstavení reaktoru. Palivo v aktivní zóně stráví většinou 4–5 let, poté je vyjmuto a je s ním dále zacházeno jako s vysoce radioaktivním odpadem.

Funkci chladiva a moderátoru zde plní demineralizovaná voda H_2O (lehká voda). Ta v primárním okruhu proudí pod vysokým tlakem (12 až 17 MPa), proto je i při teplotách kolem 300 °C v kapalném stavu. [17]

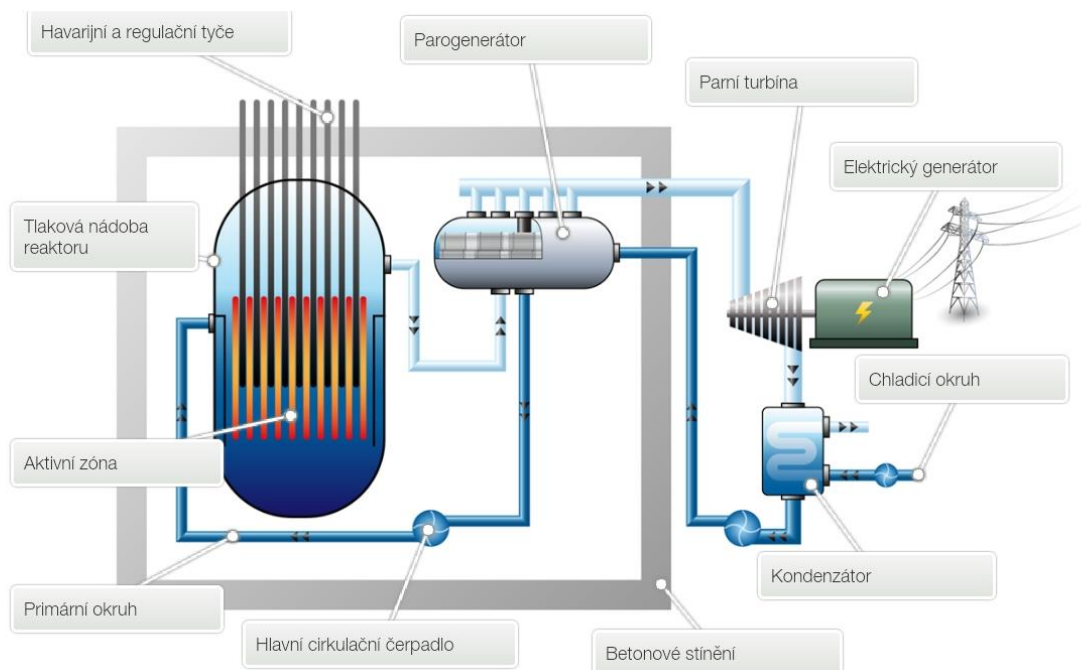
Mezi výhody tlakovodních reaktorů patří negativní teplotní koeficient¹⁶, který zaručí, že při zvyšující se teplotě v reaktoru dojde k utlumení štěpné reakce, což odvrátí nebezpečí tavení aktivní zóny. Ve srovnání s varnými reaktory nepřenáší sekundární okruh radioaktivitu k turbíně. S provozem tlakovodních reaktorů máme také největší zkušenosti, co se týče provozních reaktor/roků.

Jednou z nevýhod je skutečnost, že voda v primárním okruhu je pod velkým tlakem a v případě netěsnosti rychle uniká. S tím souvisí nutnost mnoha záložních chladicích systémů. Oproti rychlým množivým reaktorům neumí vytvářet nové palivo. [23]

Princip výroby elektrické energie v tlakovodních reaktorech již zmíněn byl, na *Obr. 4* následuje schéma této elektrárny a v *Tab. 2* jsou uvedeny typické parametry tlakovodního reaktoru temelínského typu.

¹⁵ První provozuschopná jaderná ponorka USS Nautilus byla poháněna tlakovodním reaktorem o výkonu 10 MW. [24]

¹⁶ S rostoucí teplotou v reaktoru klesá jeho výkon. Je to dáno typem použitého chladiva – vodou, – která slouží zároveň jako moderátor. V případě jejího vypaření tedy nebude docházet ke zpomalování neutronů a štěpná reakce se zastaví. [15]



Obr. 4 Schéma PWR [17]

Tab. 2 Typické parametry reaktoru VVER-1000 [25]

Obohacení uranu izotopem U^{235}	3,1 % až 4,4 %
Rozměry aktivní zóny	3 m v průměru a 3,5 m výška
Tlak vody	15,7 MPa
Teplota vody na výstupu z reaktoru	324 °C

1.3.2 Varný reaktor BWR

Jedná se o druhý nejrozšířenější typ reaktoru. V provozu je přes 80 reaktorů tohoto typu, což je téměř 20 % reaktorů na světě. Největší zastoupení má tento druh reaktorů v Japonsku, kde je podíl varných reaktorů více než poloviční.

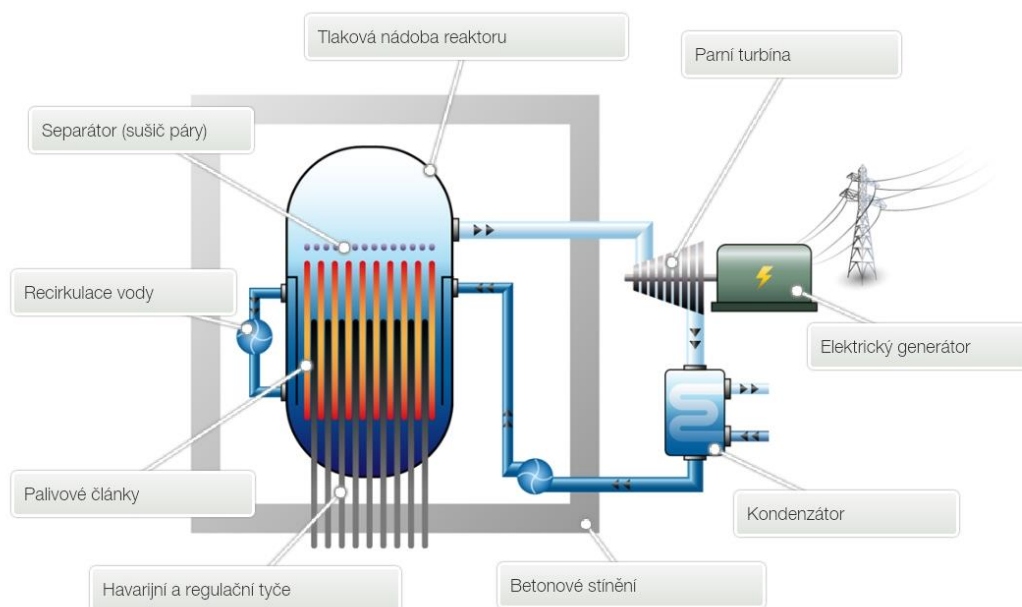
Palivem je uran obohacený na 2,1 – 2,6 % ^{235}U , tedy méně než v případě tlakovodních reaktorů. Výměna se provádí jednou za rok při odstaveném reaktoru. Palivový cyklus je dlouhý 3-4 roky.

Moderátorem i chladivem je obyčejná voda. Na rozdíl od tlakovodního reaktoru zde dochází k varu vody už v primárním okruhu. Tlak vody se zde pohybuje kolem 7 MPa, přičemž za těchto podmínek je její teplota varu cca 285 °C. [17]

Varné reaktory druhé generace byly vyvinuty na základě úspěšného reaktoru EBWR. Díky nepřítomnosti parogenerátoru má elektrárna větší účinnost. Výhodou je také nižší tlak v primárním okruhu. Pára musí být před vedením na turbínu vysušena. Reaktor obsahuje až 140 tun jaderného paliva. [15], [18]

Výhodou varných reaktorů je fakt, že se využívají v jednobokových elektrárnách, ty se vyznačují nižšími náklady na výstavbu ve srovnání s dvouokruhovými. Předností je také jednoduchá regulace výkonu pomocí množství vody protékající aktivní zónou – s rostoucím průtokem vody roste její množství v aktivní zóně na úkor páry; tato voda lépe moderuje neutrony, proto dojde ke zvýšení počtu štěpení.

Nevýhodou varných reaktorů je současný výskyt vody a páry v reaktoru, což ztěžuje bezpečnostní analýzu. Nepříznivé je také zanášení turbíny, která je v kontaktu s mírně radioaktivní parou, která vzniká v reaktoru¹⁷. V případě výpadku vnějšího napájení (blackoutu) se projeví složitější odstavování reaktorů, což se ukázalo například ve Fukušimě v roce 2011. [23]



Obr. 5 Schéma BWR [17]

Tab. 3 Typické parametry reaktoru BWR s výkonem 1000 MWe [25]

Obohacení uranu izotopem U^{235}	2,1 % až 2,6 %
Rozměry aktivní zóny	4,5 m v průměru a 3,7 m výška
Tlak vody	7 MPa
Teplota vody na výstupu z reaktoru	286 °C.

1.3.3 Těžkovodní reaktor PHWR, CANDU

Těchto reaktorů je ve světě 48, z toho 31 typu CANDU. Byl vyvinut v Kanadě¹⁸.

Palivem je přírodní uran bez jakéhokoliv obohacení. Výměna paliva může probíhat za chodu reaktoru bez nutnosti odstávek.

Jako moderátor a zároveň chladivo se používá těžká voda D_2O ¹⁹. To je důvod, proč není potřeba obohacovat použité palivo – deuterium v těžké vodě daleko méně pohlcuje volné neutrony ve srovnání s vodíkem ve vodě lehké. V primárním okruhu proudí tato těžká voda pod tlakem přibližně 9 MPa a dosahuje teploty 300 °C. V parogenerátoru se poté využívá už obyčejná voda – H_2O . [17]

Byly vyvinuty v 50. letech v Kanadě a v 80. letech se rozšířily do Indie a dalších zemí. Tento typ reaktorů produkuje více energie z jednotky vytěženého uranu než ostatní typy,

¹⁷ Většina radioaktivních izotopů je ale krátkého poločasu rozpadu – např. ^{16}N s poločasem rozpadu 7 sekund. [15]

¹⁸ Kanada se chtěla vyhnout obohacování, které je velmi finančně i technologicky náročné. [18]

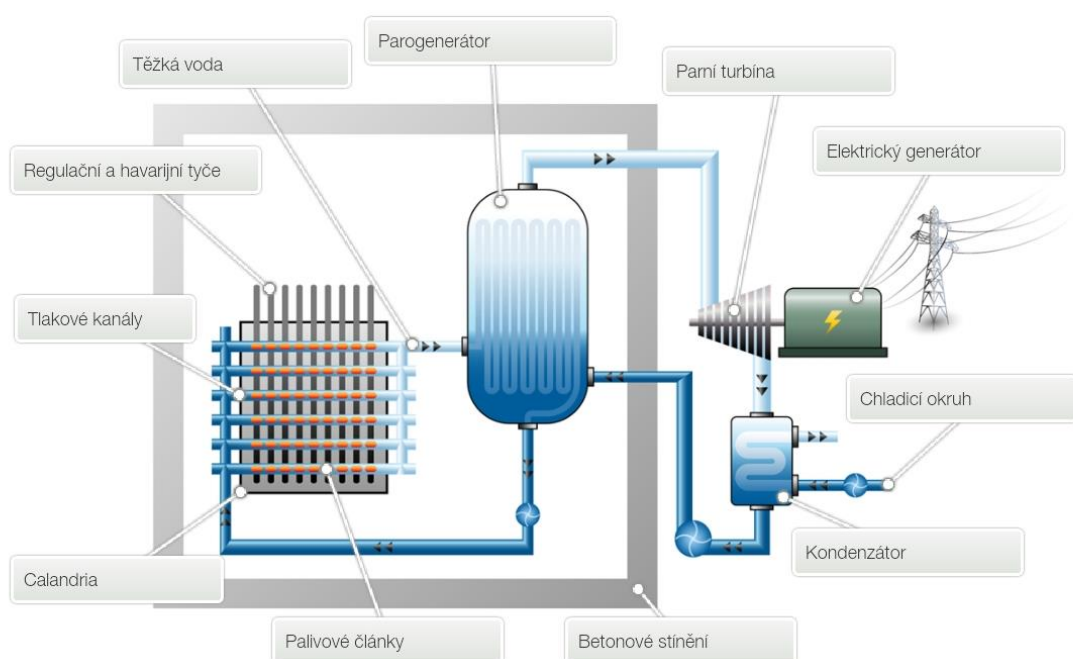
¹⁹ Jedná se o vodu, ve které je místo vodíku přítomno deuterium, izotop vodíku s jedním neutronem. [17]

vyznačuje se ale také větším množstvím odpadu na jednotku vytvořené energie. Reaktor je schopen spalovat více druhů paliva, například recyklované palivo z lehkovodního reaktoru, obohacený uran z obohacovací stanice, nebo dokonce thorium. [15]

Moderátor v podobě těžké vody musí být oddělen od těžké vody používané pro chlazení. Je nutné ho udržovat na nízké teplotě (60 °C), protože se zvyšující teplotou se snižuje jeho moderační schopnost. [25]

Výhodou je schopnost spalování přírodního (neobohaceného) uranu a možná výměna paliva za provozu, což zvyšuje efektivitu. Využívá se také možnost spalování více druhů paliva.

Nevýhodou je mírně pozitivní teplotní koeficient, kdy při zvýšení teploty v reaktoru dochází také ke zvýšení výkonu. Z deuteria v těžké vodě se zachytem neutronu může stát radioaktivní tritium, které se může dostat do okolí. [23]



Obr. 6 Schéma PHWR [17]

Tab. 4 Typické parametry reaktoru CANDU s výkonem 600 MWe [25]

Obohacení uranu izotopem U^{235}	Přírodní uran – 0,72 %
Rozměry aktivní zóny	7 m v průměru a 5,9 m výška
Tlak těžké vody v reaktoru	9,3 MPa
Teplota těžké vody na výstupu z reaktoru	305 °C.

1.3.4 Plynem chlazený reaktor GCR, Magnox, AGR

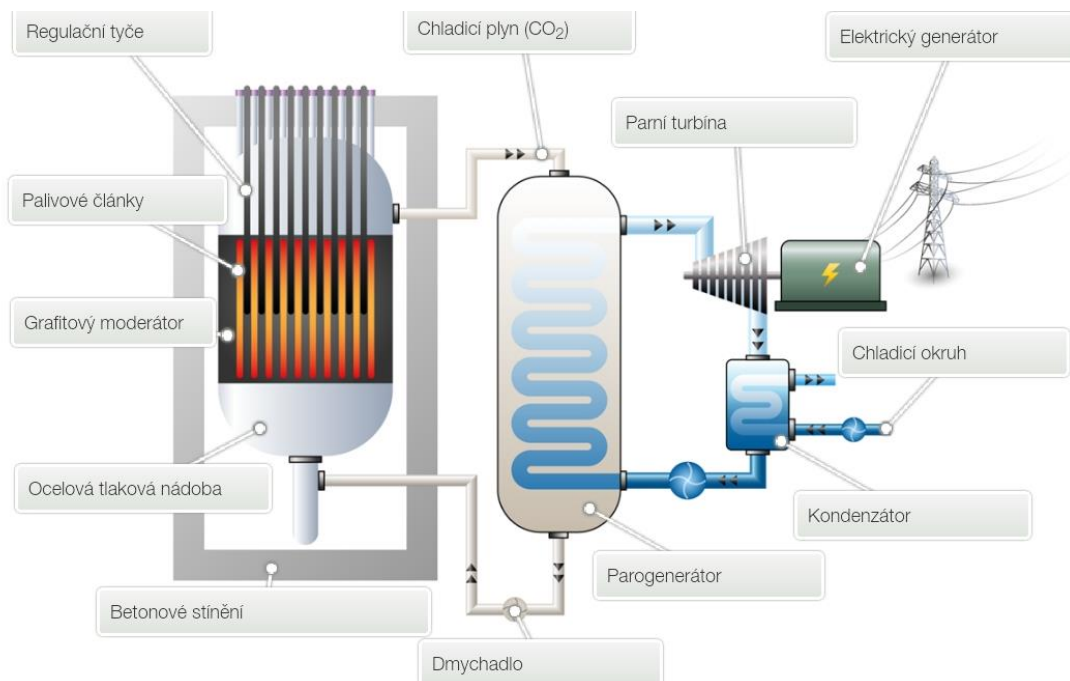
Tento typ reaktoru vyvinula Velká Británie, kromě ní ho momentálně využívá ještě Japonsko. Modernizovaných typů AGR se ve světě nachází 14.

Palivem je přírodní, nebo pro AGR mírně obohacený uran. Palivo je v aktivní zóně umístěno v tyčích pokrytých oxidem hořčíku – odtud pochází název Magnox²⁰. Výměna paliva zde může probíhat za chodu reaktoru.

²⁰ MAGNesium OXide. [17]

Moderátorem je grafit. Chladivem je oxid uhličitý CO_2 , který dosahuje tlaku 2,75 MPa a teploty až 650 °C. [17]

Princip výroby elektrické energie se v jaderných elektrárnách chlazených plynem liší od vodou chlazených pouze v použitém chladivu primárního okruhu. V parogenerátorech plyn předává teplo vodě sekundárního okruhu, která se přemění na páru a žene se na turbínu.



Obr. 7 Schéma GCR (Magnox) [17]

Tab. 5 Typické parametry reaktoru Magnox s výkonem 600 MWe [25]

Obohacení uranu izotopem U^{235}	Přírodní – 0,7 %
Rozměry aktivní zóny	14 m v průměru a 8 m výška
Tlak CO_2	2,75 MPa
Teplota CO_2 na výstupu z reaktoru	400 °C

Tab. 6 Typické parametry reaktoru AGR s výkonem 600 MWe [25]

Obohacení uranu izotopem U^{235}	2,3 %
Rozměry aktivní zóny	9,1 m v průměru a 8,5 m výška
Tlak CO_2	5,5 MPa
Teplota CO_2 na výstupu z reaktoru	450 °C

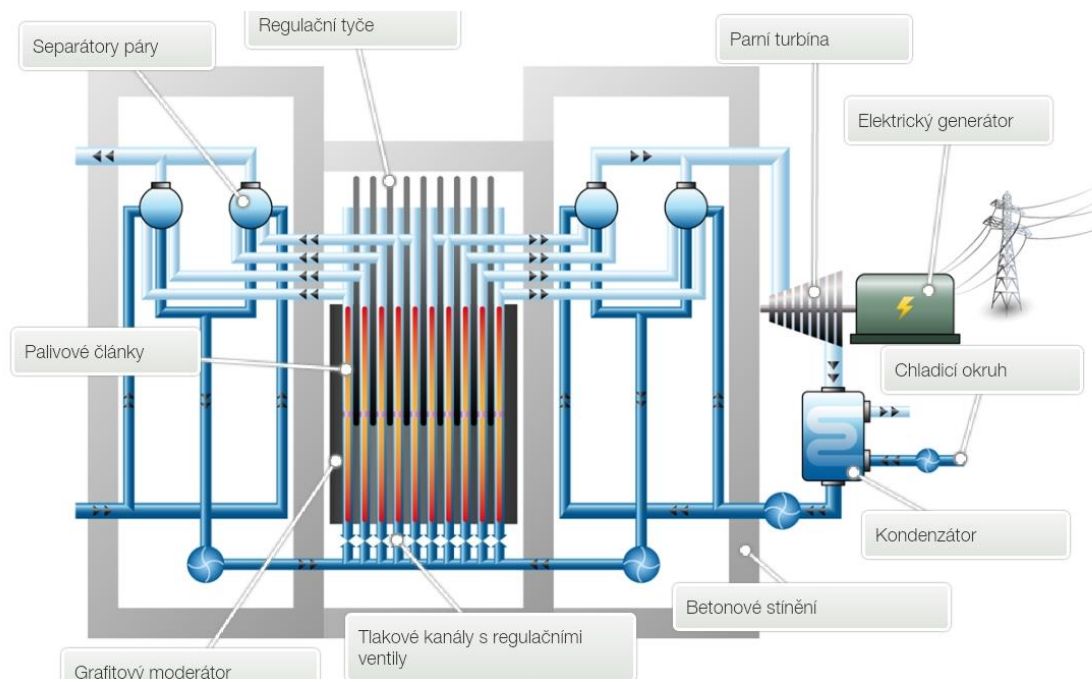
1.3.5 Reaktor typu RBMK

Tyto reaktory byly vynalezeny a používají se výhradně na území bývalého Sovětského svazu. V současnosti je v provozu 15 takovýchto reaktorů. Byla jimi vybavena i nechvalně známá jaderná elektrárna v Černobylu, kde v roce 1986 došlo k největší katastrofě v dějinách jaderné energetiky²¹.

Jedná se o reaktor podobný reaktoru BWR, moderátorem je grafit a chladivem voda. K jejímu varu dochází přímo v reaktoru. Výhodou je možnost výměny paliva za provozu. [17]

²¹ Kromě hrubých chyb obsluhy měla vliv na nehodu i nedostatečná havarijní bezpečnost tohoto typu reaktorů. [17]

Reaktor trpí bezpečnostními problémy, největší slabinou je kladný teplotní součinitel²². Při přehřátí reaktoru se vypaří chladicí voda, ale kvůli stále přítomnosti grafitového moderátoru se štěpná reakce nezastaví, jak by se v tomto případě stalo v tlakovodním reaktoru. Nové reaktory tohoto typu již nejsou ve výstavbě. [26]



Obr. 8 Schéma RBMK [17]

Tab. 7 Typické parametry reaktoru RBMK s výkonem 1000 MWe [25]

Obohacení uranu izotopem U^{235}	1,8 %
Rozměry aktivní zóny	11,8 m v průměru a 7 m výška
Počet kanálů	1693
Tlak nasycené páry	6,9 MPa
Teplota parovodní směsi na výstupu z reaktoru	284 °C

1.3.6 Reaktor štěpící rychlými neutrony FR

Tento typ reaktorů má velký potenciál pro využití v budoucnu. V současnosti jsou v provozu pouze dva tyto reaktory, plánuje se ale jejich další vývoj a výstavba.

Štěpení je prováděno rychlými neutrony, k provozu tohoto typu reaktorů není potřeba žádného moderátoru, který by neutrony zpomaloval. Palivem je směs uranu a plutonia (s podílem plutonia 15-20 %) nebo vysoce obohacený uran (až 20 %). Při srážkách rychlých neutronů s jádrem ^{238}U vzniká plutonium. Existují i tzv. množivé reaktory FBR (Fast Breeder Reactor), které dokonce vyprodukují více plutonia, než ho samy spálí. Chladivem je roztavený sodík²³. [17]

Izotop uranu ^{238}U není štěpitelný tepelnými neutrony, ale rychlé neutrony ho jsou schopny přeměnit na ^{239}Pu , které už štěpitelné tepelnými neutrony je. Palivo se obohacuje i o plutonium, které již reaktor dříve vyrobil. V těchto reaktorech vzniká mnohem více tepla,

²² Výkon reaktoru stoupá s rostoucí teplotou. [26]

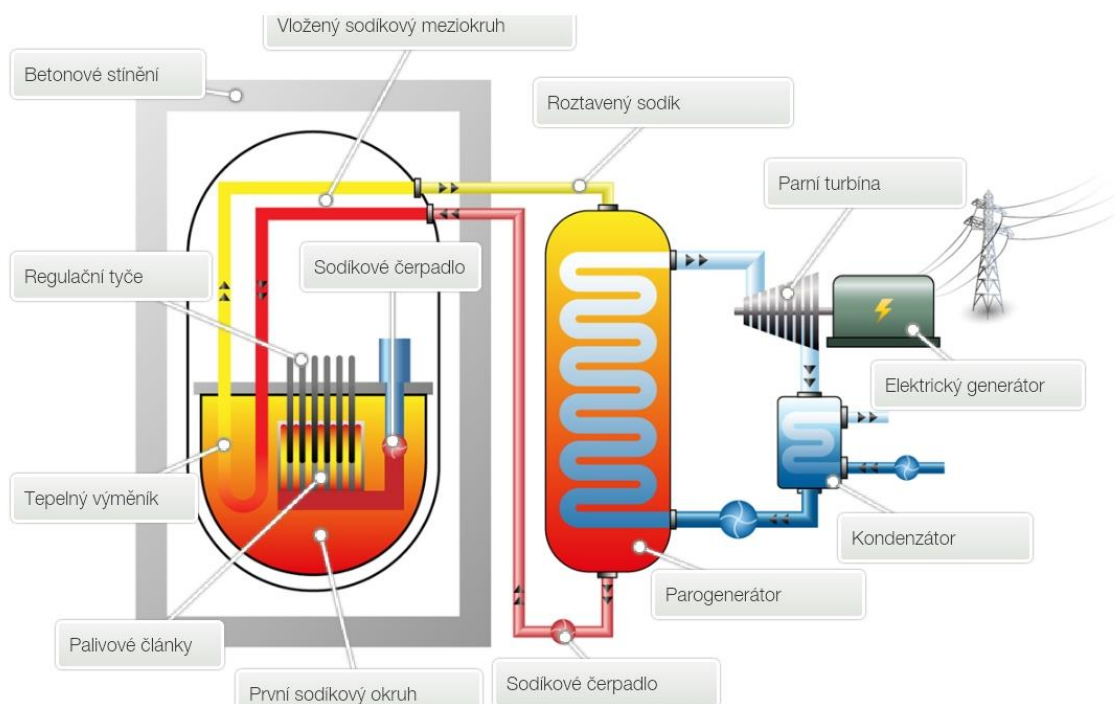
²³ Sodík je těžší než vodík, proto se neutrony pohybují rychleji než při použití vody jako chladiva. [23]

proto je nutné zajistit jeho intenzivnější odvod pomocí sodíkového chladiva. Nevýhodou sodíku je jeho reaktivita se vzduchem a s vodou, kde reaguje s kyslíkem. V těchto elektrárnách je třeba velké množství protipožárních systémů. Z bezpečnostních důvodů je v těchto elektrárnách

Sodík má vysokou teplotu varu (900 °C) a na výstupu z reaktoru dosahuje přibližně 550 °C. Na rozdíl od chladicí vody v tlakovodních reaktorech, která se blíží teplotě varu, pracuje sodík hluboko pod bodem varu. Tento fakt poskytuje tu výhodu, že není nutné tolik počítat s případnou změnou skupenství. Předností sodíku je také skutečnost, že díky jeho vysoké teplotě varu není potřeba v primárním okruhu dosahovat vysokých tlaků, jak je tomu v případě tlakovodních reaktorů. [27], [28]

Předností rychlých reaktorů je schopnost vytvářet nové palivo, navíc můžou spalovat svůj vlastní odpad. Mají také schopnost samoodstavení – díky skvělým tepelným vlastnostem sodíku.

Nevýhodou je chemická nestálost sodíku, nepříznivě působí také pozitivní teplotní koeficient. K plnému využití paliva je potřeba přepracovací stanice, což představuje hrozbu pro šíření jaderných zbraní. S tímto typem reaktorů jsou také malé zkušenosti s provozem (300 reaktor/roků). [23]



Obr. 9 Schéma FR [17]

Tab. 8 Typické parametry reaktoru FBR s výkonem 1300 MWe [25]

Obohacení paliva plutoniem	20 %
Rozměry aktivní zóny včetně plodivé oblasti	3,1 m v průměru a 2,1 m výška
Tlak sodíku	0,25 MPa
Teplota sodíku na výstupu z reaktoru	620 °C

1.4 Reaktory III. generace

Tato generace se vyznačuje modernizací základních typů reaktorů 2. generace, snahou je jejich zjednodušení a zvýšení aktivní i pasivní bezpečnosti. Častěji jsou využívány prvky inherentní bezpečnosti, která je zajištěna pouze fyzikálními zákony. Jsou schopny rychlé regulace výkonu díky odolnější konstrukci reaktoru. [17]

Zvyšuje se jednoduchost a robustnost konstrukcí, které budou navíc schopny vydržet v provozu výrazně delší dobu (až 60 let). Dbá se také na efektivnější využití jaderného paliva. Vyšším podílem vyhoření jaderného paliva se sníží i objem vysoce radioaktivních odpadů. Dochází také k prodloužení intervalu mezi výměnami paliva, což pozitivně ovlivní využitelnost elektráren. [18], [2]

1.4.1 Vylepšený varný reaktor ABWR

Jde o japonské reaktory, které jsou v provozu již delší dobu a v roce 2007 bez větších škod přečkaly velmi silné zemětřesení. Jde o vylepšení konceptu BWR od firmy GE Hitachi. Reaktory disponují elektrickým výkonem 1356 MWe. Palivem je uran ve formě UO_2 nebo jeho směs s gadoliniem o obohacení 3,2 %. Změnou prošly například ochranné systémy a ovládání reaktoru, kdy došlo k jejich plnému zdigitalizování a zjednodušení kontroly a řízení. Oproti předchozí generaci BWR byl vylepšen také systém havarijního chlazení. [18]

1.4.2 CANDU 6

Jedná se o reaktor s výkonem 740 MWe. Mezi vylepšení patří například zvýšení životnosti, modernější řídicí systémy nebo snadnější možnost regulace výkonu. [18]

1.4.3 VVER-1200

V Rusku probíhá inovace již osvědčených tlakovodních reaktorů VVER-1000, kdy je zlepšována zejména bezpečnost těchto zařízení. Tento reaktor byl již spuštěn v Novovoronežské JE. Reaktor dosahuje elektrického výkonu 1200 MWe a je uzpůsoben pro částečné spalování MOX paliva. [29]

1.5 Reaktory generace III+

Oproti generaci 3 se reaktory generace 3+ liší zejména větším důrazem na pasivní bezpečnostní prvky. Těmito opatřeními je významně snížena možnost lidské chyby a její možné dopady. Jsou zavedeny inherentní bezpečnostní prvky, které se s případnou havarijní situací dokáží vypořádat samy, na základě všeobecně platných fyzikálních zákonů. Příkladem využití inherentní bezpečnosti je spoléhání se na gravitaci nebo přirozenou konvekci (proudění). [18]

1.5.1 Francouzsko-německý EPR

Je založen na PWR. Jsou provedena vylepšení týkající se hlavně bezpečnosti – reaktor je chráněn dokonce dvojdielným betonovým kontejnmentem. Vnitřní část kontejnmentu odolává i velkému tlaku zevnitř, zatímco vnější část poskytuje ochranu proti všem vnějším vlivům (například i pádu letadla). Jsou k dispozici čtyři na sobě nezávislé havarijní chladicí systémy, z nichž každý je sám schopen účinně dochladiť reaktor v případě výpadku klasického chlazení. Palivem může být uran ve formě UO_2 nebo MOX. Reaktor dosahuje tepelného výkonu 4500 MW a účinnosti 36 % - to zaručuje elektrický výkon 1620 MWe. [18]

Tento typ reaktorů je v současnosti ve výstavbě ve finské elektrárně Olkiluoto a ve francouzském Flamanville. Jedná se o reaktory o výkonu 1600 až 1750 MWe. Společná je pro tyto elektrárny firma, která stavbu provádí, jedná se o francouzskou firmu Areva²⁴. [29]

1.5.2 Americký tlakovodní reaktor AP1000

Je to nástupce předchozí generace AP600. Nejvýznamnější inovace se odehrály opět ve zvýšení bezpečnosti, prodloužení životnosti a také zmenšení finanční náročnosti na výstavbu. Zajímavými bezpečnostními řešeními jsou například odvod tepla hromadícího se v kontejnmentu, které je odváděno pomocí přirozené cirkulace vzduchu nebo havarijní systém chlazení vodou z nádrží, kdy voda je do reaktoru vytlačována stlačeným dusíkem a díky tomu není systém závislý na elektrické energii. Elektrický výkon reaktoru by měl dosahovat 1150 MWe. [18]

1.5.3 Kanadský pokročilý reaktor CANDU ACR-1000

Jedná se o pokračování projektu CANDU-6. Bezpečnostní vylepšení zahrnují například systém kontrolních tyčí nebo soustavu trysek vstřikujících do reaktoru kapalnou sloučeninu obsahující gadolinium. Každý z těchto velmi efektivních systémů dokáže za pouhé dvě sekundy snížit tepelný výkon reaktoru o 90 %. [18]

1.5.4 Lehkovodní varný reaktor ESBWR

Jde o nástupce reaktorů ABWR. Tento reaktor je z bezpečnostního hlediska zajímavý tím, že ke chlazení nepotřebuje čerpadla. Veškerá cirkulace teplotnosné a chladicí látky je zajištěna přirozenou cirkulací, jedná se tedy o velmi spolehlivý systém nezávislý na elektřině a technologiích. Další bezpečnostní pojistkou jsou kondenzátory, které budou v případě havárie odvádět páru z reaktoru a po jejím zkondenzování ji jako chladicí vodu znovu vrátit do reaktoru. Bezpečnostní systémy jsou na takové úrovni, že po dobu 72 hodin po havárii není nutný jakýkoliv zásah obsluhy – systémy si poradí samy. Reaktor by měl dosahovat výkonu 1600 MWe. [18]

1.6 Zhodnocení jaderných reaktorů

Reaktory druhé generace začínají pomalu ale jistě dosluhovat. Je v našem zájmu, abychom je co nejrychleji nahradili modernějšími reaktory třetí generace. Cestou modernizace stávajících reaktorů nelze jít donekonečna. Mohlo by se stát, že v případě potřeby nahradit větší množství dosluhujících reaktorů budou chybět stavební kapacity a firmy, které by byly schopny tak složitou výrobu a výstavbu provést. Velký útlum ve stavbách nových jaderných elektráren v posledních desetiletích, minimálně v západním světě, rozhodně jadernému průmyslu neprospívá. Situaci tak zachraňuje Asie, kde se v zemích jako Čína nebo Indie budují stále nové reaktory a masivní výstavba je naplánována i do budoucna – většina firem, zabývajících se stavbou jaderných elektráren, se tedy přesunula do těchto zemí.

²⁴ Firma Areva je ve velkých problémech; stavba Olkiluoto začala v roce 2003 a počítalo se s dokončením v roce 2009 a s cenou 3 mld. eur. Na počátku roku 2017 je nejoptimističtější termínem rok 2018 a minimální cena 8,5 mld. eur. [30]

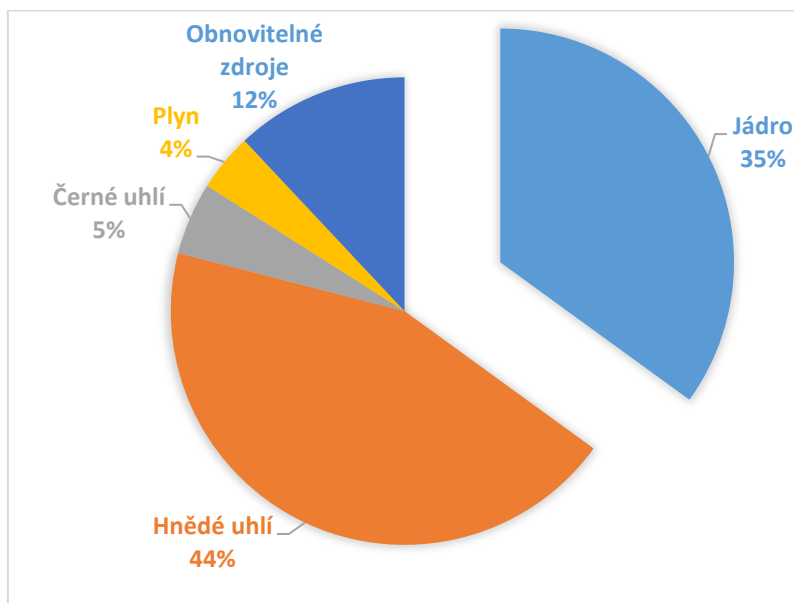
2 Jaderné elektrárny v České republice

V České republice se nacházejí dvě jaderné elektrárny – Dukovany a Temelín. Vlastníkem obou elektráren energetická skupina ČEZ, a. s. Jsou zbudovány v jižní části České republiky, v oblastech, kde jsou pro stavbu jaderných elektráren nejlepší podmínky, např. nepřítomnost vulkanické činnosti, krasových a dalších jevů, které by mohly ohrozit bezpečnost. [1]



Obr. 10 Umístění jaderných elektráren v ČR

V energetickém mixu České republiky se jaderné elektrárny podílejí na výrobě elektrické energie přibližně z jedné třetiny. V roce 2015 bylo v České republice vyrobeno 83,9 TWh elektrické energie, z toho 26,8 TWh pocházelo z jaderných zdrojů. [31]



Obr. 11 Český energetický mix – výroba elektrické energie v roce 2015 [30]

2.1 Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany stojí na hranici dvou krajů – Vysočiny a Jihomoravského kraje. Dukovany byly spolu se slovenskou jadernou elektrárnou Jaslovské Bohunice výsledkem československé spolupráce se Sovětským svazem, týkající se mírového využití jaderné energie, která započala v 70. letech. Byly naplánovány celkem čtyři bloky, každý z nich o elektrickém výkonu 440 MWe. Všechny čtyři bloky byl spuštěny v rozmezí let 1985–1987 a od té doby se takřka nepřetržitě velkou měrou podílí na produkci elektrického proudu v Československu, respektive České republice.

Spolu s jadernou elektrárnou Dukovany byla v 70. letech vystavěna přečerpávací vodní elektrárna Dalešice, která slouží jako další zásobárna výkonu. Má schopnost dosáhnout plného výkonu 480 MWe během pouhých 90 sekund. Je ovládaná dálkově z dispečinku ČEPS²⁵ a je využívána pro vykrytí energetických špiček. Dalešická hráz je s výškou 100 metrů nejvyšší v ČR. Součástí Dalešic je i vodní nádrž Mohelno, která slouží jako zdroj vody pro jadernou elektrárnu. [9], [32]



Obr. 12 Letecký pohled na Dukovany [33]

Dukovany disponují čtyřmi tlakovodními reaktory VVER 440/V213 (viz Obr. 13). Po modernizaci má každý z nich elektrický výkon 510 MWe, který byl zvýšen z původních 440 MWe. Elektrárna je rozdělena do dvou hlavních bloků. V každém bloku jsou dva reaktory spolu s dalšími, nejadernými částmi elektrárny – např. strojovnou. [17]

²⁵ Česká energetická přenosová soustava. Zajišťuje přenos elektřiny a rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. [34]

Došlo zde k navýšení životnosti elektrárny na 40 let, s ohledem na technický vývoj je možné ještě další prodloužení²⁶. V průběhu let docházelo ke změnám, které měly pozitivní vliv na množství vyrobené elektřiny – např. zkracování doby plánovaných odstávek nebo méně časté generální opravy různých komponent. Ke zvýšení elektrického výkonu elektrárny přispěla například výměna rotorů nízkotlakých dílů turbín.

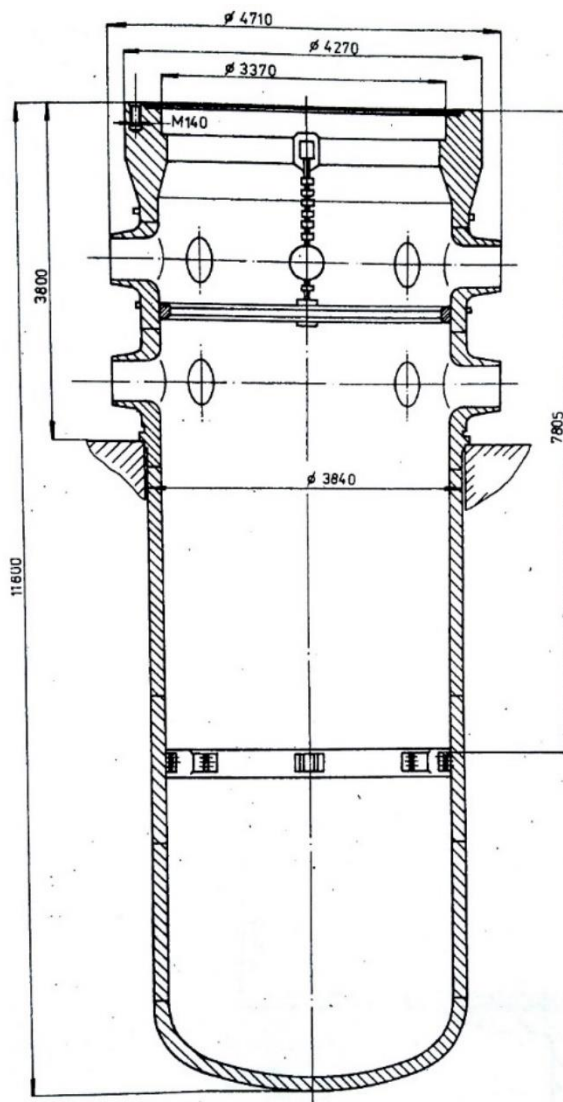
Pro dlouhodobou regulaci výkonu reaktoru slouží kyselina boritá, která se přidává do chladicí vody. Pro krátkodobé změny jsou určeny regulační kazety, kdy zasouváním a vysouváním částí obsahujících absorbátor dochází ke snížení, resp. zvýšení tepelného výkonu reaktoru.

Jaderným palivem v dukovanské elektrárně je oxid uraničitý UO_2 , který se lisuje do malých pelet, vážících přibližně 5 gramů. Pelety se uzavírají do trubek ze zirkoniové slitiny, tímto vznikají palivové proutky. Aktivní zóna reaktoru obsahuje celkem 312 palivových a 37 regulačních kazet (viz Obr. 14).

Od roku 2003 elektrárna pracuje na pětiletý palivový cyklus²⁷, který v porovnání s cyklem tříletým a čtyřletým představuje značné ekonomické úspory a šetří také náklady na skladování paliva.

Další inovací bylo použití gadolinia jako vyhořívajícího absorbátoru v jaderném palivu. S postupným snižováním množství štěpitelného ^{235}U se snižují i absorpční účinky gadolinia, reaktor si tedy udržuje konstantní hodnotu tepelného výkonu. Bylo také možné snížit obohacení paliva ^{235}U z původních 4,38 % na 4,25 %²⁸.

Elektrárna byla nejdříve naprojektována na trvalý provoz v základním zatížení, tj. na 100 % výkonu. Po roce 1989 musela být připravena i na provoz v proměnném zatížení, byly tedy přidány možnosti sekundární regulace všech bloků. Nyní jsou všechny čtyři bloky schopny měnit svůj výkon podle současných potřeb elektrické sítě. Na jednu zarážku paliva je elektrárna schopná pracovat 7000 hodin při stoprocentním výkonu. [9]

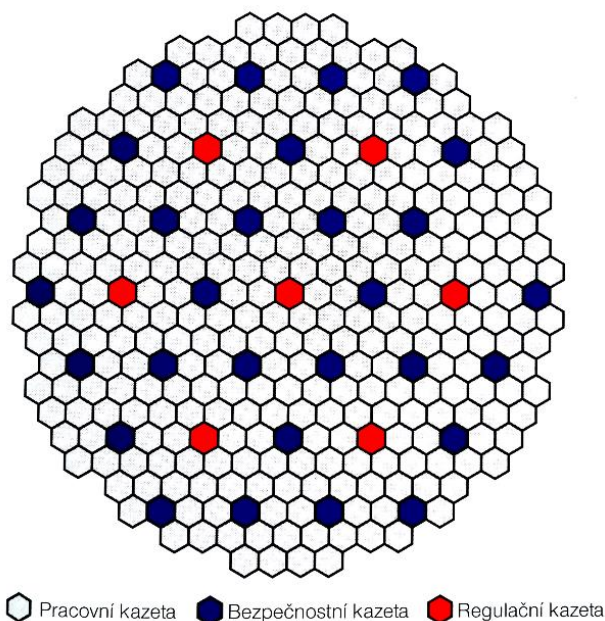


Obr. 13 Tlaková nádoba reaktoru VVER 440 [35]

²⁶ ČEZ chce elektrárnu provozovat minimálně do roku 2025. [9]

²⁷ Postupně se experimentuje s šestiletým palivovým cyklem. [12]

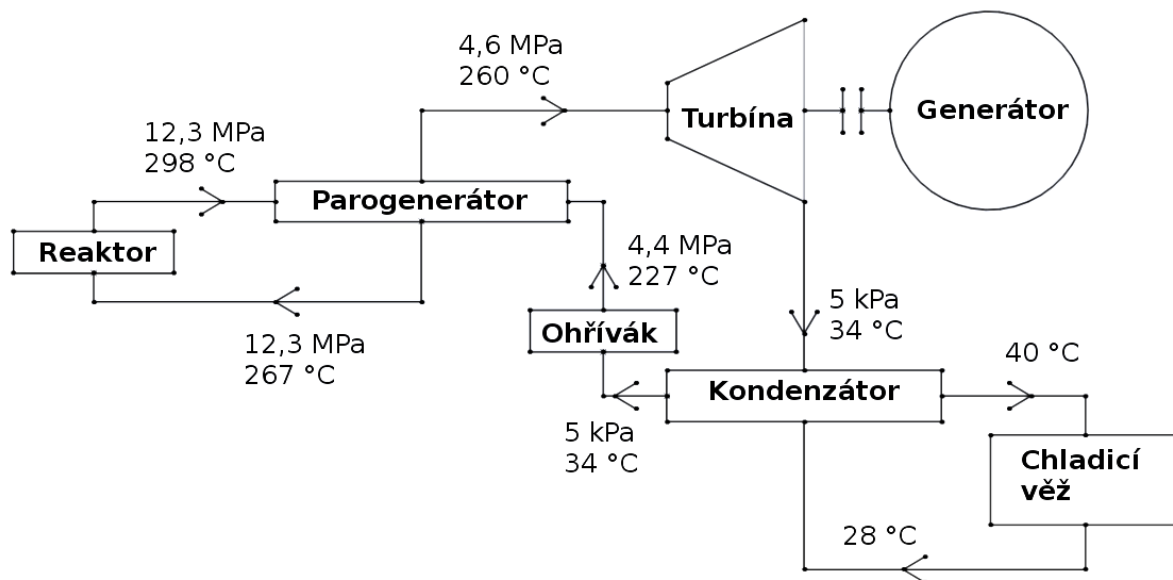
²⁸ Podle počátečního stupně obohacení je také použité palivo tříděno do různě barevných kontejnerů – na více obohacené palivo jsou určeny zelené kontejnery, na méně obohacené palivo potom kontejnery modré. [12]



Obr. 14 Aktivní zóna dukovanského reaktoru [9]

V Dukovanech se v roce 2015 vyrobilo nejméně proudy od roku 2000²⁹. Důvodem byly neplánované odstávky, způsobené kontrolami svarů, které bylo nutno provést kvůli nejasnostem v jejich servisní historii. [36]

Na Obr. 15 je uvedeno zjednodušené schéma dukovanské elektrárny s tlakovodním reaktorem VVER 440. Jsou zde vyznačeny hlavní směry proudění vody a páry a také jejich tlakové a teplotní parametry. Pára se v tomto schématu vyskytuje pouze před a za turbínou, všechny ostatní parametry odpovídají kapalně vodě.



Obr. 15 Schéma dukovanské elektrárny s parametry vody a páry v oběhu [37], [Tab. 9]

²⁹ Roční produkce elektřiny činila 12,6 TWh, průměrná produkce v posledních letech je přibližně 15 TWh. [36]

2.2 Temelín

Temelín leží v Jihočeském kraji, nedaleko města Týn nad Vltavou. Jaderná elektrárna Temelín se začala stavět v 80. letech, takřka ihned po dokončení dukovanské elektrárny. Stavbu komplikovaly stížnosti Rakouska, které zpochybňovalo bezpečnost jaderné energetiky, ovlivněno nedávnou katastrofou v Černobylu (1986). Původně byla naplánována stavba čtyř bloků o elektrickém výkonu 981 MWe. V 90. letech byly práce na třetím a čtvrtém bloku zastaveny, a to zejména kvůli konci řady podniků energeticky náročného těžkého průmyslu, které zde vyrostly za socialismu. Třetí a čtvrtý blok zůstaly rozestavěné a čekají na eventuální využití do budoucna, například ve spojitosti s dostavbou. První a druhý blok byly do provozu uvedeny v letech 2002, resp. 2003. Stejně jako v Dukovanech zde v průběhu času probíhaly modernizace, týkající se například generátorů, turbín či paliva, a v roce 2015 již výkon obou bloků činil 1090 MWe.



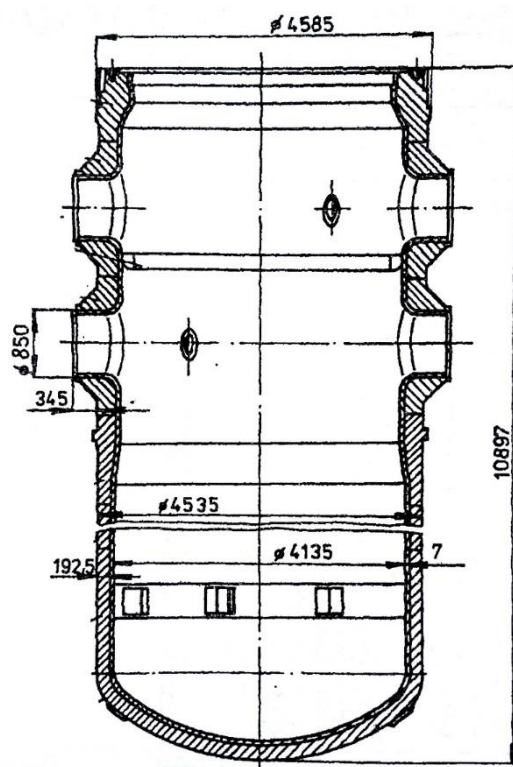
Obr. 16 Letecký pohled na Temelín [38]

Podobně jako Dukovany odebírají vodu z nádrže Mohelno, v souvislosti s výstavbou Temelína byla postavena Vodní nádrž Hněvkovice, která slouží jako zdroj technologické vody pro elektrárnu.

V Temelíně jsou v provozu dva reaktory VVER 1000/V320 (viz Obr. 17). Jedná se o tlakovodní reaktory novější generace ve srovnání s Dukovany. Reaktory VVER patří po modernizaci, která probíhá takřka neustále, k jedním z nejlépe fungujících reaktorů světa. Díky jejich dlouhému provozu bylo získáno mnoho zkušeností s provozem a většina nedostatků byla úspěšně odstraněna. [32], [1], [39]

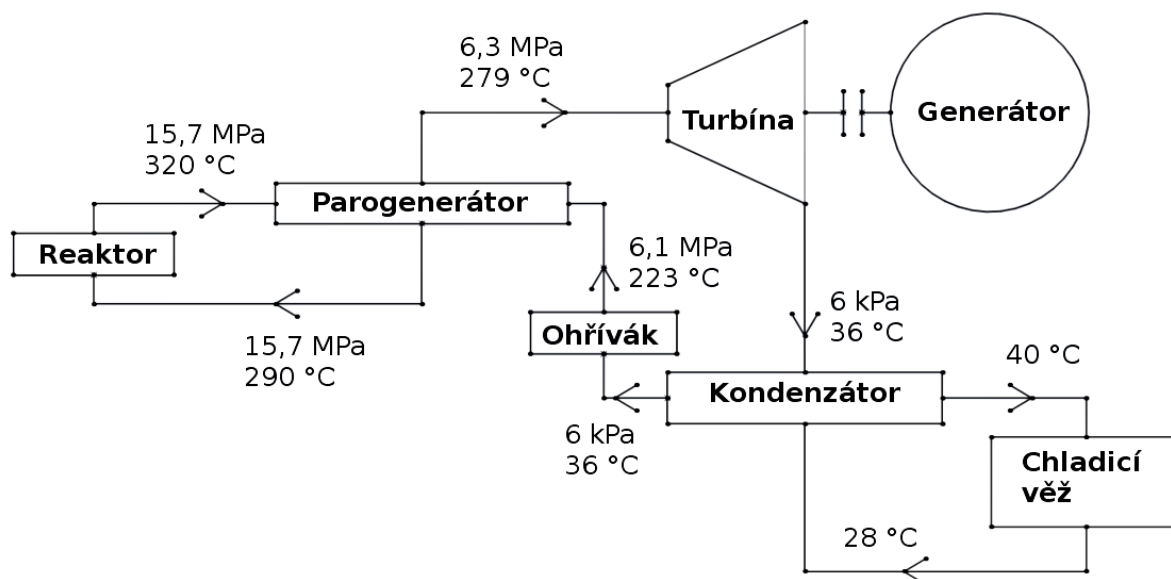
V průběhu provozu došlo stejně jako v Dukovanech ke zlepšení mnoha parametrů elektrárny, např. zvýšení výkonu nebo zkrácení doby pravidelných odstávek. Na zvýšení výkonu měla velký vliv rekonstrukce rotorů parních turbín. Doba odstávky byla příznivě ovlivněna například zvýšením rychlosti zavážecího stroje, to umožňuje rychlejší výměnu paliva.

Na rozdíl od Dukovan, kde je primární okruh chráněn pouze reaktorovou budovou, jsou k tomuto účelu vybudovány dva kontejnmenty – obrovské železobetonové stavby, které tvoří bezpečnostní bariéru mezi jadernou částí elektrárny a okolím. Jedná se o 56 metrů vysoké stavby z předpjatého betonu, které jsou schopny odolat například nárazu dopravního letadla. Vnitřní povrch je tvořen osmimilimetrovou vrstvou uhlíkové oceli, která tvoří zábranu proti úniku radionuklidů do okolí. Tloušťka stěny činí 1,2 metru. Uvnitř kontejnmentů je vytvářen mírný podtlak, aby v případě netěsnosti nedocházelo k úniku látek do okolí, ale nasávání vzduchu z okolního prostředí³⁰. Dva temelínské kontejnmenty je možno vidět v pravé části Obr. 16. [5]



Obr. 17 Tlaková nádoba reaktoru VVER 1000 [35]

Schéma elektrárny Temelín na Obr. 18 se svým uspořádáním shoduje s dukovanskou elektrárnou. Od Dukovan se drobně liší v parametrech vody a páry v cirkulaci. To je dáno zejména modernější konstrukcí Temelína a použitím jiného, výkonnějšího reaktoru VVER 1000. Podrobnější srovnání nejdůležitějších parametrů obou jaderných elektráren uvádí Tab. 9.



Obr. 18 Schéma temelínské elektrárny s parametry vody a páry v oběhu [40], [Tab. 9]

³⁰ Vzduch proudí z míst o vyšším tlaku do míst s nižším tlakem. [5]

Tab. 9 Srovnání parametrů Dukovan a Temelína [9], [41], [42], [43], [44], [45]

Reaktor	Dukovany	Temelín
Typ	VVER 440/V213	VVER 1000/V320
Počet	4	2
Nominální tepelný výkon	1444 MWt ³¹	3120 MWt ³²
Průměr tlakové nádoby	3,56 m	4,5 m
Výška tlakové nádoby	11,8 m	10,9 m
Hmotnost tlakové nádoby	215 t	322 t
Počet palivových kazet	312 ks	163 ks
Počet palivových proutků v kazetě	126 ks	312 ks
Počet regulačních kazet	37 ks	61 ks
Hmotnost paliva	42 t	92 t
Teplota vody vstupující do reaktoru	267 °C	290 °C
Teplota vody vystupující z reaktoru	298 °C	320 °C
Pracovní tlak v primárním okruhu	12,3 MPa	15,7 MPa
Parogenerátor		
Počet na reaktor	6	4
Tlak páry na výstupu	4,61 MPa	6,3 MPa
Teplota páry na výstupu	260 °C	278,5 °C
Turbína		
Počet vysokotlakých dílů	1	1
Počet nízkotlakých dílů	2	3
Turbogenerátor		
Počet	8	2
Výkon	255 MWe ³³	1090 MWe ³⁴
Chladicí věže		
Počet	8	4
Výška	125 m ³⁵	154,8 m

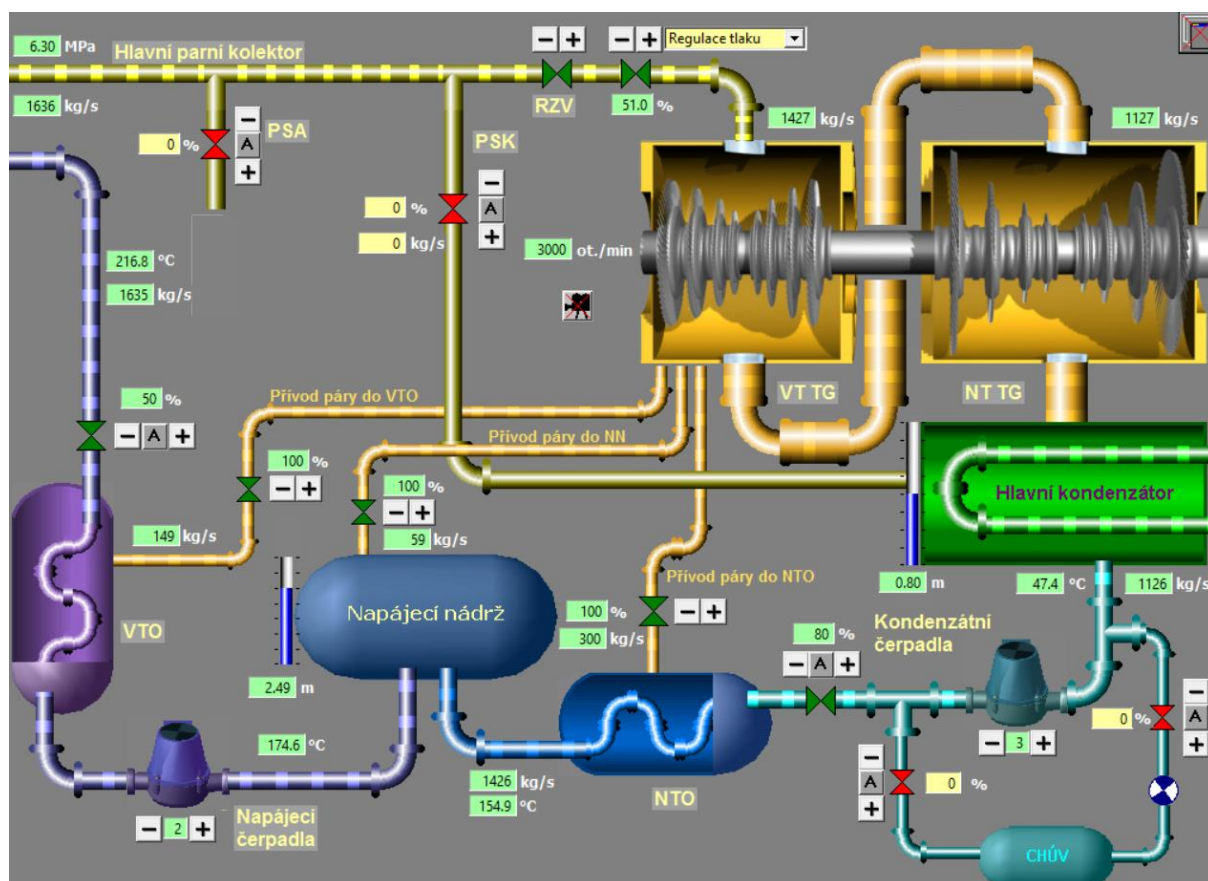
³¹ Zvýšen z původních 1375 MWt. [9]³² Zvýšen z původních 3000 MWt díky čerpání projektových rezerv. [45]³³ Zvýšen z původních 220 MWe. [9]³⁴ Zvýšen z původních 981 MWe. Tohoto výkonu bylo dosaženo na obou blocích roku 2014, resp. 2015 výměnou rotorů. [44]³⁵ Z materiálu na stavbu jedné věže by mohly být postaveny dva kilometry dálnic. [12]

2.3 Sekundární okruh jaderné elektrárny

Kapitola sepsána s využitím zdrojů [37], [40], [46], [47], [48].

Sekundární okruh slouží k přeměně tepelné energie vzniklé v reaktoru na energii elektrickou. Je tvořen zejména turbínou, kondenzátorem a systémem ohříváků. Proudění vody je zajištěno čerpadly. Turbína je přímo spojena s generátorem elektrického proudu.

Princip fungování sekundárního okruhu bude popsán na příkladu JE Temelín, schéma jeho sekundárního okruhu je uvedeno na *Obr. 19*. Tento princip je stejný pro většinu elektráren s tlakovodními reaktory, tedy i pro dukovanskou elektrárnu.



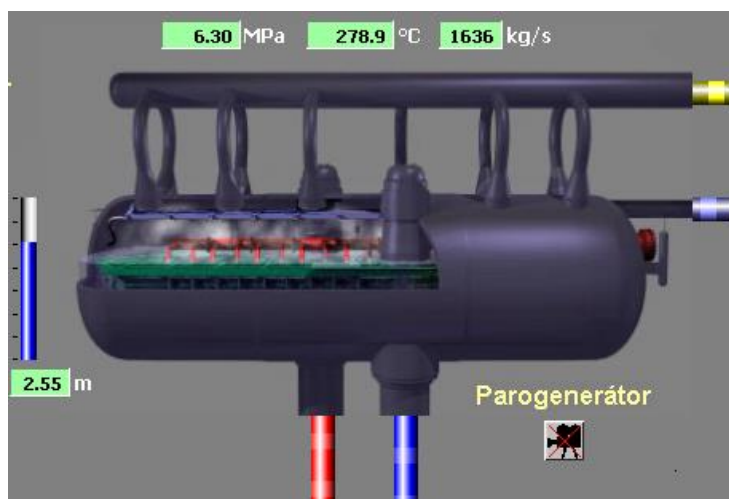
Obr. 19 Zjednodušené schéma sekundárního okruhu JE Temelín [48]

Vysvětlivky k Obr. 19: PSA – přepouštěcí stanice do atmosféry, PSK – přepouštěcí stanice do kondenzátoru, RZV – rychlozávěrný ventil turbíny, VT TG – vysokotlaký díl turbíny, NT TG – nízkotlaký díl turbíny, CHÚV – chemická úprava vody, NN – napájecí nádrž, NTO – nízkotlaký ohřívák, VTO – vysokotlaký ohřívák. [48]

V parogenerátoru (viz *Obr. 20*) proudí trubkami voda primárního okruhu ohřátá v reaktoru. Předává zde teplo vodě sekundárního okruhu, která se na povrchu trubek vypařuje a vzniklá sytá pára³⁶ je hlavním parním kolektorem vedena na turbínu. Na hlavním parním kolektoru jsou bezpečnostní ventily (přepouštěcí stanice do kondenzátoru a atmosféry), které v případě zvýšeného tlaku páry v hlavním kolektoru odpustí tuto páru do kondenzátoru, resp.

³⁶ Pára o teplotě rovné teplotě varu za daného tlaku. [47]

atmosféry. K případnému zamezení přístupu páry na turbínu slouží rychlozávěrný ventil. Pára přivedená na turbínu expanduje v jejím vysokotlakém dílu. Po překročení limitní vlhkosti páry dochází k jejímu vysušení a meziohřevu (přihřevu), aby nedocházelo k poškození (erozi) oběžných lopatek turbín³⁷. Přihřívání páry je prováděno parou vystupující přímo z parogenerátoru. Část páry je po průchodu vysokotlakým dílem nepokračuje dále, ale je přivedena do ohříváků, kde předává teplo vodě mířící do parogenerátoru³⁸. Přehřátá pára putuje na nízkotlaké díly turbíny, kde předá svou energii a následně míří do kondenzátoru, kde jí je odváděno teplo chladicí vodou terciárního okruhu. Je žádoucí v kondenzátoru dosáhnout nízkého tlaku, aby pára zkondenzovala při co nejnižší teplotě a tepelná účinnost oběhu byla co nejvyšší³⁹. Z kondenzátoru je voda čerpadly převáděna do napájecí nádrže, cestou je ohřata v nízkotlakých ohřívácích⁴⁰. V napájecí nádrži dochází k dalšímu ohřátí vody, dojde zde i k jejímu odplynění⁴¹. Voda z napájecí nádrže je potom napájecími čerpadly přes vysokotlaké ohříváky hnána do parogenerátoru. (Text k Obr. 19)



Obr. 20 Parogenerátor JE Temelín [48]

Předchozí popis fungování sekundárního okruhu je jednou z variant Rankin-Clausiova cyklu, který je velmi často používaným tepelným oběhem v parostrojních zařízeních. Je běžné ho zobrazovat v termodynamických diagramech. Na Obr. 21 a Obr. 22 jsou uvedeny cykly Dukovan, resp. Temelína v T-s diagramech, zobrazující závislost teploty T na měrné entropii s⁴².

³⁷ Přihřevem se obecně zvyšuje tepelná účinnost parního cyklu; v jaderných elektrárnách, které pracují na vstupu pouze se sytou (nikoliv přehřátou) parou, je přihřev určen spíše pro zlepšení kvality páry, která se zbaví vlhkosti a nezpůsobí degradaci turbíny. [46]

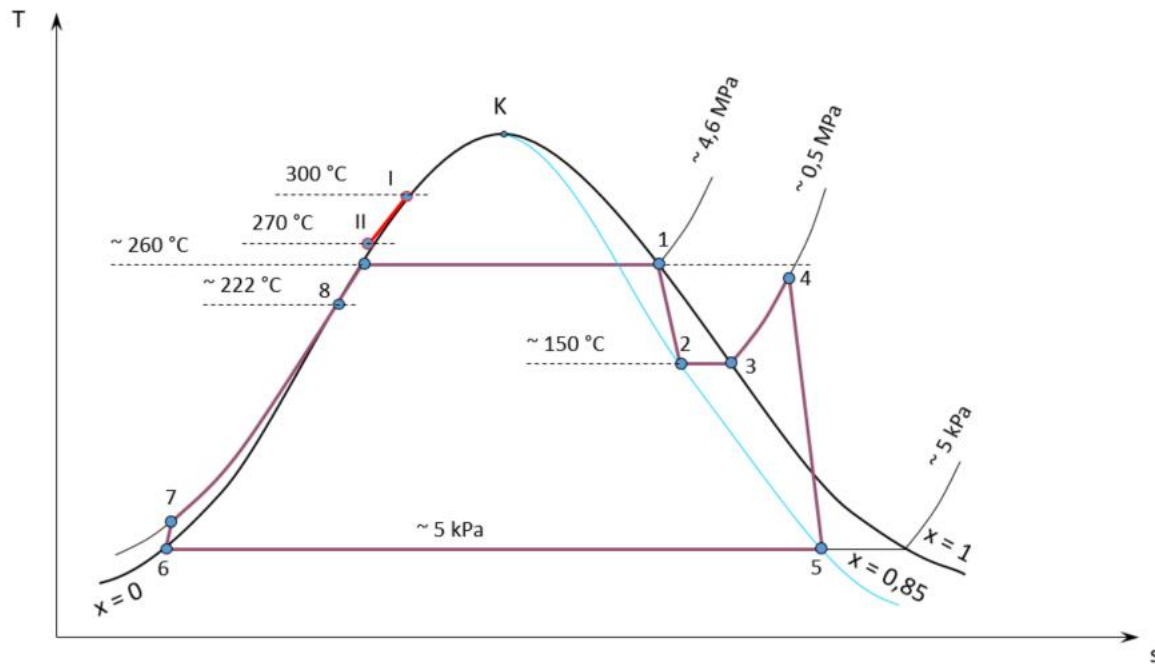
³⁸ Cílem je zvýšit průměrnou teplotu, při které voda v parogenerátoru přijímá teplo z primárního okruhu a zvýšit tím termickou účinnost – dojde k tzv. carnotizaci oběhu. Tento proces se nazývá regenerace páry. [46]

³⁹ V kondenzátoru je udržován tlak v jednotkách kPa. [46]

⁴⁰ JE Dukovany má celkem pět nízkotlakých ohříváků, v každém z nich je voda ohřata přibližně o 20 °C. [37]

⁴¹ Snižuje se zejména obsah kyslíku a oxidu uhličitýho ve vodě, které by mohly způsobovat korozi. [37]

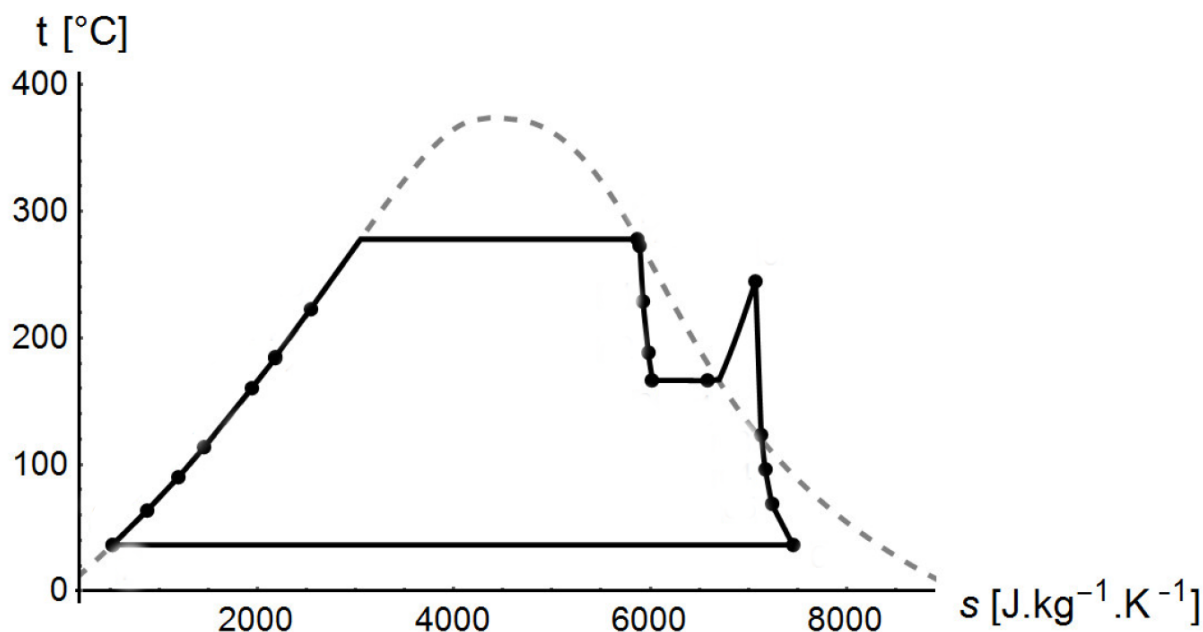
⁴² Entropie je stavová veličina, která charakterizuje míru uspořádanosti systému. Měrná entropie je vztažena na jednotku hmotnosti a její jednotka je J.K⁻¹.kg⁻¹. [47]



Obr. 21 T-s diagram parního cyklu elektrárny Dukovany [49]

V bodě 1 se nachází sytá pára vzniklá v parogenerátoru, ta je vedena na turbínu. Ve vysokotlakém dílu turbíny expanduje do bodu 2 (mokrý pára o suchosti 0,85). Poté projde separátorem vlhkosti, kdy dojde k vysušení páry a odloučení přebytečné vlhkosti. Z bodu 3 do bodu 4 dochází k ohřívání syté páry, tedy k tvorbě páry přehřáté. Pára je znovu vedena na turbínu, tentokrát na její nízkotlaké díly. Po dosažení kritické suchosti pára za nízkého tlaku kondenzuje v kondenzátoru. V bodě 6 se již jedná o sytou kapalinu⁴³. Z bodu 6 do bodu 8 dochází ke zvyšování teploty vody v nízkotlakých ohřívácích, napájecí nádrži a vysokotlakých ohřívácích (k regeneraci). Po dosažení teploty 222 °C míří voda do parogenerátoru, kde jí je vodou primárního okruhu dodáváno teplo a zahřívá se až na sytou páru o teplotě 260 °C, kdy se dostane znovu do bodu 1. Hodnoty 300 a 270 °C jsou přibližné teploty vstupní a výstupní vody primárního okruhu proudící do/z parogenerátoru. (Text k Obr. 21)

⁴³ Kapalina o teplotě rovné teplotě varu za daného tlaku. [47]



Obr. 22 T-s diagram parního cyklu elektrárny Temelín [40]

2.4 Budoucnost jaderné energetiky v České republice

Již dlouhá léta se vedou debaty ohledně dostavby obou jaderných elektráren v České republice. Je to dáno hlavně tím, že české zdroje elektrické energie postupně dosluhují, ať se jedná o elektrárny uhelné, tak i jaderné, a do budoucna bude důležité je nahradit.

V souvislosti s dostavbou bylo v roce 2009 vyhlášeno výběrové řízení na dodavatele dvou jaderných bloků pro JE Temelín. O zakázku v hodnotě 200-300 miliard korun soupeřilo několik firem – francouzská AREVA, americký Westinghouse a česko-ruské Konsorcium MIR.1200. Všechny nabízely tlakovodní reaktory generace III a III+, jmenovitě šlo o reaktory EPR (1750 MWe), AP1000 (1200 MWe) a MIR.1200⁴⁴ (1200 MWe). V průběhu výběrového řízení byla vyloučena firma AREVA, kvůli jejím stížnostem bylo rozhodnutí o dodavateli pozdrženo. V roce 2014 byl tendr na dostavbu Temelína zrušen. Důvodem bylo rozhodnutí státu neposkytovat záruky na výkup elektřiny z nově postavených bloků. [50], [51], [52]

Provozovatel jaderných elektráren v České republice, skupina ČEZ, se věnoval i možnosti dostavby JE Dukovany. Tvrdí, že současná situace na trhu s elektřinou není výstavbám nových energetických zdrojů nakloněná, kvůli plánovanému odstavování uhelných elektráren jde ale o nutný krok. Optimistické předpovědi dostavby pátého bloku v JE Dukovany mluví o letech 2032 až 2035. [33]

V roce 2015 premiér Bohuslav Sobotka potvrdil novou koncepci získávání elektrické energie v České republice: *"V koncepci počítáme s tím, že kolem 50 procent vyrobí jádro. Dalších 25 až 30 procent pak připadá na obnovitelné zdroje a zbytek připadá na plyn a uhlí."* Uvedl také, že vzhledem ke zvyšování podílu jaderné energie je vláda připravena vystavět nové bloky v Dukovanech i v Temelíně, konkrétní termíny ale neuvedl. [53]

⁴⁴ Jedná se o modifikaci reaktoru VVER-1200 pro evropský trh. [50]

2.5 Zhodnocení české jaderné energetiky

Česká jaderná energetika, podobně jako ta světová, podléhá jisté stagnaci. V našich jaderných elektrárnách jsou prováděny pravidelné modernizace, které postupně zvyšují instalovaný výkon a bezpečnost, již dlouho je ale odkládáno rázné řešení ohledně dostavby nových bloků, které má podle mého názoru stejnou, ne-li vyšší prioritu. Stavba jaderného bloku je v dnešní době během na dlouhou trať, trvajícím mnoho let, proto by se s rozhodnutím o dostavbě nemělo otálet. Z mého pohledu vychází lépe možnost dostavby JE Dukovany, protože se jedná o elektrárnu starší, a nevyhnutelné odstavení tamních bloků nastane pravděpodobně dříve, než tomu bude v Temelíně.

3 Budoucnost jaderné energetiky

3.1 Reaktory IV. generace

Do budoucna se počítá s vývojem šesti typů reaktorů. Jedná se o reaktory pracující při vysoké teplotě, tři z nich využívají ke štěpení rychlé neutrony.

První praktické využití této generace se odhaduje na rok 2030. Jejich společnou vlastností je upuštění od použití vody jako chladiva – využijí se jiná chladicí média, která jsou schopna zvládat vyšší teploty, což souvisí se zvýšením účinnosti provozu. Hlavní posun se očekává v oblasti rychlých a množivých reaktorů, schopných spalovat i ^{238}U a ^{232}Th . Jejich kombinací s klasickými, ^{235}U spalujícími elektrárnami, by měl být zajištěn dlouhodobě udržitelný dostatek paliva. Díky vysokým teplotám chladiva v těchto reaktorech může být teplo využíváno i průmyslově – například na výrobu vodíku.

Z hlediska bezpečnosti je velký důraz kladen na prvky pasivní bezpečnosti, které jsou založené na fyzikálních zákonech. Takových systémů je v elektrárně několik a všechny fungují nezávisle na sobě. Jsou také zavedena opatření proti zneužití štěpného materiálu pro vojenské a teroristické účely – přepracovací stanice se většinou budou nacházet přímo v areálu elektrárny.

Zajímavým řešením pro snížení nákladů na výstavbu je vytvoření standardních modelů elektráren, které by takto byly budovány ve větších sériích. To by zjednodušilo projektování a výstavbu elektráren a také snížilo celkové náklady.

Životnost reaktorů 4. generace je udávána kolem 60 let. Hlavní důraz je kladen na zvyšování životnosti tlakové nádoby, která se nedá nahradit ani vyměnit, a určuje tedy maximální životnost celého reaktoru. Toho se docílí využitím stále kvalitnějších materiálů, které jsou co nejvíce odolné proti silným neutronovým tokům. [17], [54]

3.1.1 Vysokoteplotní reaktory HTGR

V současnosti se využívá pouze jako experimentální a výzkumný reaktor. Jeho slibnost spočívá ve vysoké účinnosti⁴⁵ přeměny tepelné energie na elektrickou, která souvisí s vysokou teplotou chladiva.

Palivem je vysoce obohacený uran ve formě malých kuliček, které jsou rozmístěny ve větší grafitové kouli. Moderátorem je grafit, který slouží též jako matrice pro jaderné palivo. Jako chladivo se používá helium pod tlakem 4 MPa, které má dosahovat teplot až 900 °C, značně vyšších než u předchozích reaktorů. [17]

Vysokoteplotní reaktory nemají velkou budoucnost pro výrobu elektřiny, ale spíše pro jiná odvětví – doprava, průmysl. Počítá se s využitím vysoké teploty v průmyslu, například při desalinizaci vody nebo při výrobě vodíku. S výhodou by tyto reaktory mohly být využity pro velké průmyslové komplexy, jimž by tzv. kogenerací výroby tepla a elektřiny mohly dodávat jak elektřinu, tak procesní teplo⁴⁶.

Zajímavou vlastností vysokoteplotních reaktorů je malý objemový výkon aktivní zóny. Nižší výkonová hustota je dána typem chladiva – heliem⁴⁷. To spolu s odolností paliva proti teplotám až 1600 °C znamená, že reaktor má schopnost samoodstavení a ochlazení⁴⁸.

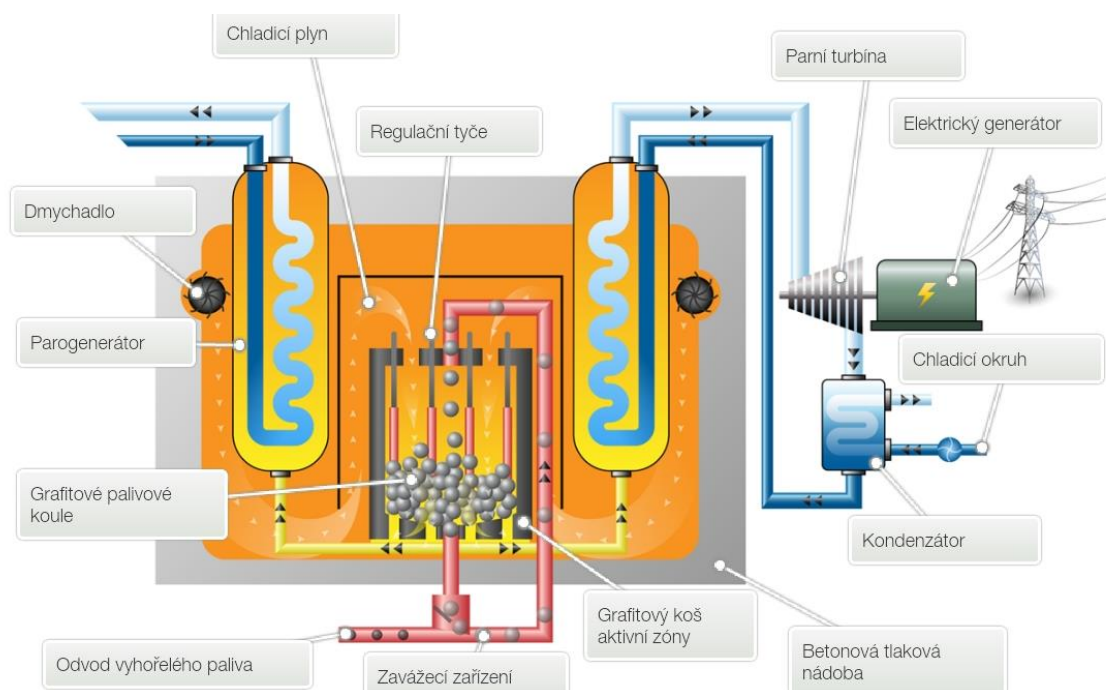
⁴⁵ Ta je cílena na 50 %. [2]

⁴⁶ Tato kombinace by byla velmi výhodná například pro petrochemický a metalurgický průmysl. [54]

⁴⁷ Helium má horší schopnost odvodu tepla než voda, v aktivní zóně je tedy potřeba větší objem chladiva. [2]

⁴⁸ Reaktor se ochladí sám pomocí přírodních zákonů, aniž by došlo k tavení paliva. [2]

Nevýhody souvisí s typem použitého chladiva – plyn má horší chladicí schopnosti než voda, proto je třeba většího objemu na odvedení stejného tepla. Reaktory dosahují velkých rozměrů a je zatím málo zkušeností s jejich využíváním. [23], [2], [54]



Obr. 23 Schéma HTGR [17]

3.1.2 Reaktory využívající vodu v superkritické fázi SCWR

Moderátorem i chladivem je voda v superkritické fázi. Jde o reaktor, kdy se voda vyskytuje za vysokého tlaku a teploty, kdy oba tyto parametry převyšují kritický bod⁴⁹. V tomto typu reaktorů by měla mít voda teplotu 510–550 °C a tlak 25 MPa. Při těchto stavových parametrech má voda vlastnosti kapaliny i plynu. Je dosaženo vyšší účinnosti⁵⁰, ale voda v superkritickém stavu vyžaduje vyšší antikorozi ochranu použitých potrubí, a tedy využití kvalitnějších materiálů. Jsou uplatněny některé prvky známé z varných reaktorů – pára putuje na turbínu rovnou z reaktoru, není potřeba parogenerátor. Palivem je obohacený uran ve formě oxidů. [54], [55]

3.1.3 Olovem chlazené rychlé reaktory LFR

V současnosti jsou podobné reaktory používány v ruských ponorkách. Chladivem je olovo nebo jeho slitina s bismutem. Přítomnost bismutu v olovu snižuje teplotu tavení, což je výhodné, ale jeho reakcemi s neutrony se dochází k produkci radioaktivního polonia. Inovativním návrhem pro co nejširší využití jaderné energie je možnost výstavby tzv. baterií. Jedná se o rozměrově malé reaktory o elektrickém výkonu 50-150 MWe, které díky tomu bude možné převážet například po železnici i do odlehklých míst, například v rozvojových zemích.

⁴⁹ Hodnota kritického bodu pro vodu H₂O je 374 °C a 22,1 MPa. [47]

⁵⁰ Až 45 %. [54]

Výhodou je také nemožnost zneužití jaderného paliva, které je po celou dobu provozu reaktoru (15-20 let) neprodyšně uzavřeno v reaktoru bez možnosti jeho vyjmutí. [54], [56]

3.1.4 Reaktory založené na roztavených solích MSR

Používají kapalné palivo, například ve formě fluoridových solí. Roztavené soli by měly fungovat zároveň jako palivo i chladivo. Z hlediska vývoje jde o velmi složitý typ reaktorů. Výhodou je možnost výměny paliva za provozu. Použité kapalné palivo je také jen velmi obtížně vojensky zneužitelné. [54], [56]

3.1.5 Rychlé reaktory chlazené plynem GFR

Jako chladivo bude sloužit helium. Palivem by mohla být keramická směs uranu a plutonia⁵¹. Jako rychlý reaktor bude mít za úkol recyklovat štěpné produkty a snížit množství dlouhodobě aktivních radioizotopů v odpadu. [54], [56]

3.1.6 Sodíkem chlazené rychlé reaktory SFR

Rychlé neutrony by v tomto typu reaktorů byly schopny spalovat plutonium i ostatní transurany. K uvedení do praxe mají relativně blízko, počítá se s rokem 2030. [54]

3.2 Termojaderná fúze

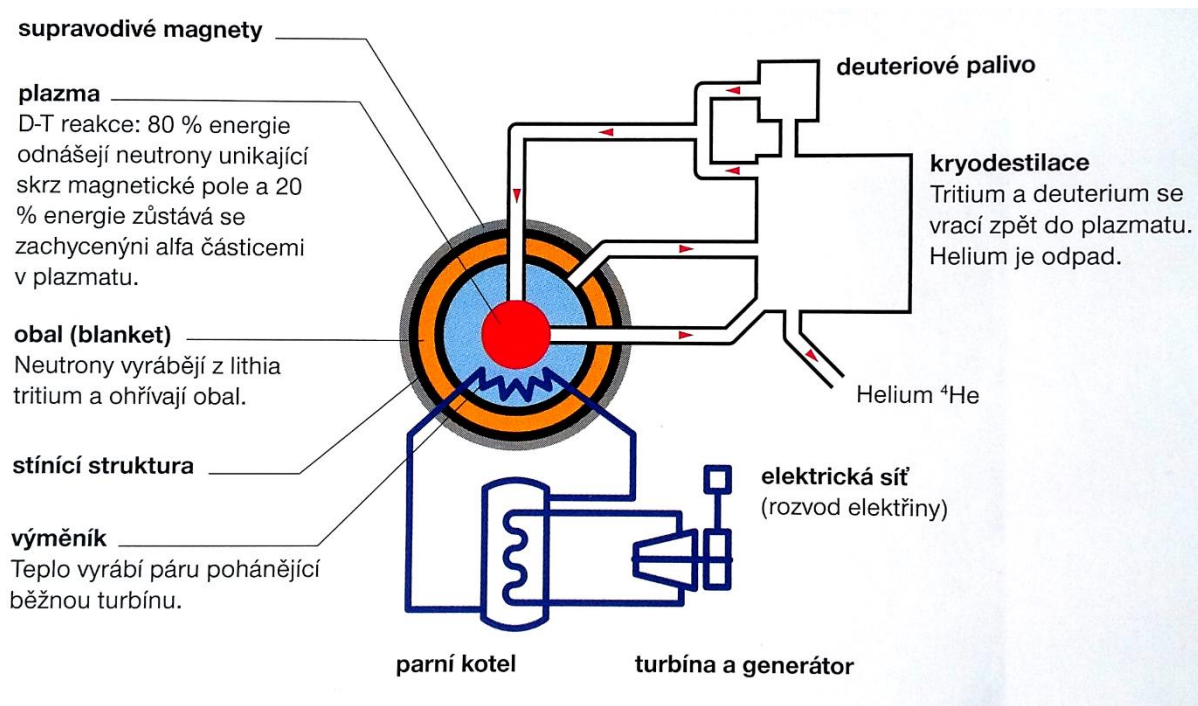
Lidstvo se o zvládnutí procesu jaderného štěpení snaží už desítky let, ale výsledek je stále v nedohlednu. Jde o slibný způsob uspokojování energetických požadavků lidstva, neboť sloučením lehkých jader se uvolní mnohem více energie na jednotku hmoty než štěpením uranu. Tento děj ale neprobíhá za normálních podmínek, je nutné zajistit teplotu řádově 100 milionů Kelvinů a udržet ji po delší dobu. Tento problém brání efektivnímu využití energie z jaderné fúze. [17]

Nejjednodušším příkladem jaderné fúze je slučování dvou jader vodíku na jádro deuteria. Jde však o proces velmi pomalý a štěpení probíhá s velmi malou pravděpodobností – proto jsou potřeba velké objemy vodíku, jak je tomu například na Slunci. Z hlediska praktické využitelnosti se jako nejlepším jeví využití deuteria a tritia⁵², při jejichž slučování vzniká helium (alfa částice) a neutron. Nevýhodou je velmi malá rozšířenost tritia na Zemi, je nutné ho získávat například z lithia v plodivé obálce jaderného reaktoru. [57]

Ve Francii už několik let probíhá nejdražší vědecko-technický projekt na zemi s názvem ITER. Spolupracuje na něm mnoho evropských zemí. Jedná se o výstavbu termojaderného reaktoru, který by měl dokázat možnost či nemožnost reálného využití jaderné fúze pro energetické účely. [58]

⁵¹ Může být použito i plutonium z vyřazených jaderných zbraní. [56]

⁵² Jedná se o izotopy vodíku s jedním, resp. dvěma neutrony. [57]



Obr. 24 Schéma termojaderné elektrárny [5]

3.3 Transmutace radioaktivního odpadu

Jedná se o technologie, které by do budoucna mohly přinést řešení problému s použitým jaderným palivem. Transmutací se z dlouhodobě a vysoceaktivních izotopů stávají izotopy s kratším poločasem rozpadu, které nejsou tak náročné na pozdější skladování. Během této transmutace dochází ke štěpení prvků, toho můžeme využít i k výrobě další elektřiny. Transmutaci musí předcházet chemické přepracování, kdy se z použitého jaderného paliva oddělí stále použitelný uran, který tvoří až 95 % objemu paliva. Zbylé transuranové prvky a další štěpné produkty slouží jako palivo do transmutačního reaktoru. [5]

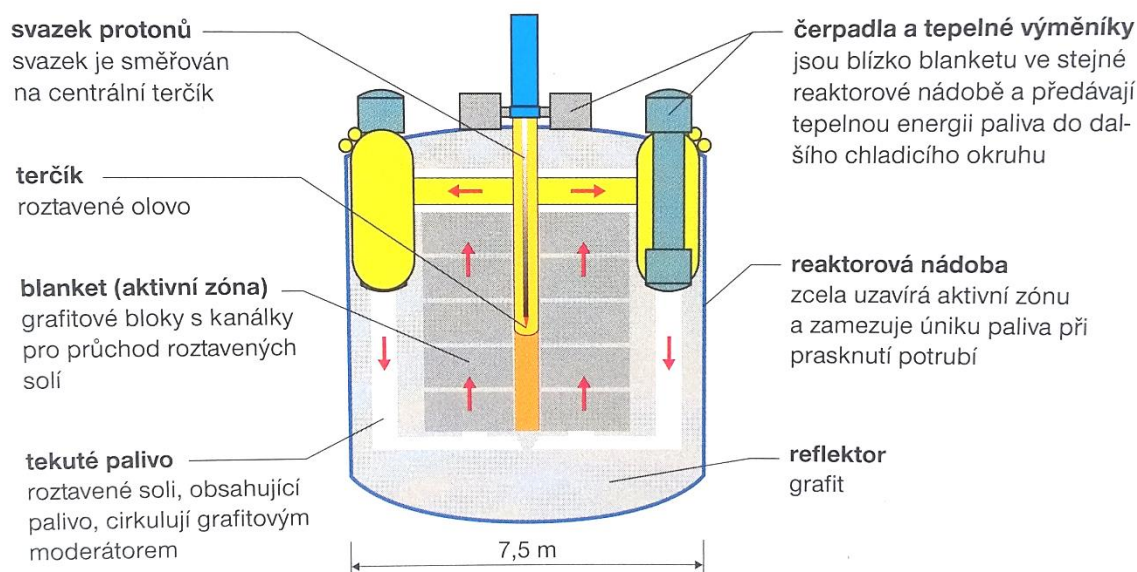
3.3.1 Technologie ADS

Neutrony potřebné ke štěpení jsou získávány z vnějšího zdroje. Tím je v tomto případě urychlovač protonů, které nárazem na olovený terčik způsobí tříštivou reakci, při které jsou z terčiku vyráženy neutrony. I přes to, že urychlovače spotřebovávají velké množství elektrické energie, mohou být použity k další výrobě elektřiny. Výhodou je, že reakce nemůže probíhat samovolně bez vnějšího zdroje neutronů, bezpečnost je tedy zajištěna. Schéma zařízení používající technologii ADS je uvedeno na Obr. 25. [5]

3.3.2 Technologie MSR

Jedná se o pokročilý vysokoteplotní reaktor. Palivo by bylo rozpuštěno ve formě fluoridových solí, a docházelo by k tzv. on-line přepracování paliva. Část kapalného paliva by byla zbavována štěpných produktů a po doplnění nových štěpitelných izotopů vrácena zpět⁵³. [5]

⁵³ Tuto možnost umožňuje pouze kapalně palivo. [27]



Obr. 25 Transmutace radioaktivního odpadu technologií ADS [5]

3.4 Thoriový cyklus

Jedná se o zcela inovativní řešení, které by umožnilo využití jaderné energie i v zemích, které nemají přístup k uranu, ale vlastní zásoby thoria. Jednou z takových zemích je například Indie, na využití thoria jako jaderného paliva se zaměřuje také Čína.

Thorium jako takové nelze efektivně štěpit v klasických reaktorech, důvodem k tomu je jeho sudý počet nukleonů (232). Záchytem neutronu a dvojitým beta minus rozpadem⁵⁴ je ale možné jej převést na ^{233}U , který již lze štěpit tepelnými neutrony.

Tato koncepce vyžaduje nasazení rychlých množivých reaktorů, ve kterých by probíhala právě přeměna thoria na ^{233}U . Ten by se poté používal jako palivo v klasických reaktorech, kde probíhá štěpení moderovanými neutrony.

Výhodou využití thoria je jeho velká rozšířenost na Zemi⁵⁵ a nemožnost jeho zneužití k výrobě jaderných zbraní. [59], [60]

3.5 Malé modulární reaktory

Klasická jaderná elektrárna je v současnosti ekonomicky zisková pouze v dlouhodobém horizontu. Při dnešním tvrdém konkurenčním boji dává většina dodavatelů elektřiny přednost například plynovým elektrárnám s velmi malou počáteční investicí⁵⁶. Uvedením velké jaderné elektrárny do provozu může také na trhu vzniknout přebytek elektřiny, čímž se zákonitě sníží její cena. Z tohoto důvodu může být výhodné využití menších reaktorů, které vynikají nižšími investičními náklady a slibují tedy ekonomickou návratnost v menším časovém horizontu⁵⁷.

⁵⁴ Jde o druh přeměny, při které se neutron v jádře vyzářením elektronu a antineutrína změní na proton. Dojde tedy ke zvýšení protonového čísla o jedno, nukleonové číslo zůstane nezměněno. [61]

⁵⁵ Světové zásoby thoria se odhadují na trojnásobek zásob uranu. [60]

⁵⁶ U plynových elektráren tvoří největší cenovou složku vyrobené elektřiny náklady na palivo. [62]

⁵⁷ I když cena za jednotku výkonu je vyšší než v případě velkých jaderných elektráren. [63]

Výhodou modulárních reaktorů je možnost jejich individuálního využití, stejně jako možnost jejich spojení do většího výkonového celku. Je snaha dosáhnout reaktorů vyráběných sériově, zatím se jedná spíše o kusovou výrobu s obrovskými náklady⁵⁸.

Podobná malá zařízení jsou už dlouhou dobu v provozu například v jaderných ponorkách nebo ledoborcích. Je ale třeba dodat, že u vojenského využití se tolik nedbá na ekonomičnost a ekologickou stránku věci. Pro civilní využití je proto třeba ještě jistých zlepšení.

Malé modulární reaktory jsou plánovány pro umístění pod zemí a budou spojeny s dalšími komponentami pro výrobu elektrické energie. Bude se jednat o reaktory rychlé, chlazené sodíkem nebo směsí olova a bizmutu.

Velkou nevýhodou klasických jaderných elektráren je ztížená možnost jejich krátkodobé regulace⁵⁹. Modulární reaktory tento problém řeší, jejich tepelný výkon je dobře regulovatelný v řádu hodin a mají dokonce možnost odklonění páry pohánějící turbínu. Pomocí těchto opatření by došlo k zamezení situací, kdy vzniká negativní cena elektřiny⁶⁰.

Velké využití by mohly modulární reaktory najít i na odlehlých místech, plánuje se jejich využití například na Aljašce. Uvažuje se také o využití pro vodíkové hospodářství nebo odsolovací stanice.

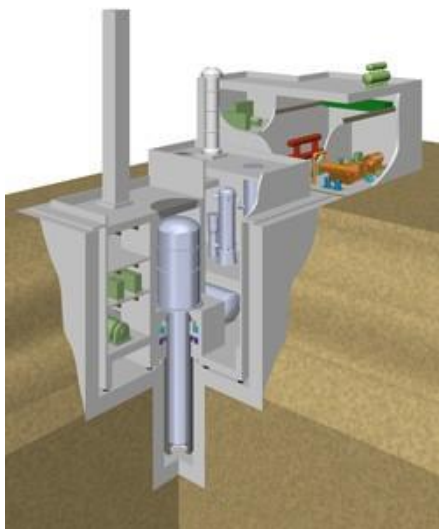
Projekty nabírají zpoždění způsobené nynější protiatomovou náladou, ale také svou velkou náročností. Jak se svém článku tvrdí Martin Tůma, v oblasti atomové energie platí přísloví „desetkrát měř, pak ještě dvakrát a až nakonec řízni“ [64].

Příkladem modulárního reaktoru je projekt Toshiba 4S (viz Obr. 26), který má nabídnout až 50 MWe výkonu, kdy pro jeho umístění do země stačí plocha 22 krát 16 metrů. V roce 2016 byla v USA podána první žádost o výstavbu modulárního reaktoru společností TVA. [64], [63]

⁵⁸ Autor uvádí paralelu s rozšířením a cenou automobilů před a po Henry Fordovi, který zavedl jejich sériovou výrobu. [64]

⁵⁹ Cílem je dodávat elektřinu v době, kdy je jí nedostatek a cena je vysoká, naopak ji nevyrábět v situaci, kdy je jí přebytek. [63]

⁶⁰ Výrobci elektřiny musí platit odběratelům, aby odebírali přebytečnou elektřinu v elektrické síti. [65]



Obr. 26 Reaktor Toshiba 4S [64]

3.5 Zhodnocení budoucnosti jaderné energetiky

Budoucnost jaderné energetiky z velké části závisí na úspěchu projektu ITER. Na revoluční pokroky v oblasti jaderné fúze se bohužel stoprocentně spoléhat nedá, proto bude klíčové rozvíjet i další slibné způsoby získávání energie z jádra. Podle mého názoru mají největší budoucnost malé modulární reaktory, jakožto pouhá inovace již existujících reaktorů. Je bohužel pravděpodobné, že jejich většímu rozšíření bude více než technické problémy zabraňovat strach veřejnosti z využívání jaderné energie.

Závěr

Jaderná energetika neprožívá v současnosti zrovna světlé období. Téměř všechny projekty nabírají velká zpoždění a mnohonásobně se prodražují, z části kvůli své technologické složitosti, z části kvůli negativnímu postoji veřejnosti k jaderné energii. Tyto postoje jsou způsobeny zejména neopodstatněným strachem o bezpečnostní hledisko jaderných elektráren. Střízlivým pohledem na věc lze ale konstatovat, že energie z jádra je i přes své některé nesporné nevýhody jednou z nejzelenějších, nejlevnějších, a při správném provozování i nejbezpečnějších možností výroby elektrické energie.

Před Evropou a obecně západní civilizací stojí nyní velký problém, jak do budoucna zajistit dostatek elektrické energie. Při stále se zhoršujícím stavu ovzduší je trendem opouštění od spalování fosilních paliv a jejich nahrazování obnovitelnými zdroji. Ty samotné ale veškerou poptávku po elektřině nezajistí, podle mého názoru je tedy využití jaderné energie do budoucna nevyhnutelné.

Naprosto odlišně je však jaderná energie vnímána zejména v asijských zemích, jako jsou Čína, Indie nebo Jižní Korea, které musí uspokojovat své stále rostoucí energetické potřeby. Zde se v posledních letech soustředila většina světové výstavby nových jaderných reaktorů a elektráren. Většina firem zabývajících se jadernou energetikou se v současnosti zaměřuje právě na tyto země, proto lze asijské státy považovat za spasitele jaderného průmyslu, který by jinak spíše upadal.

Jak dokládá poslední kapitola této práce, budoucnost jaderné energetiky stále nabízí spoustu zajímavých způsobů, jak ještě lépe využít energii ukrývanou se v jádrech atomů. Zda se tyto předpovědi a naděje splní, bude záležet na rychlosti technologického pokroku, ale také na přístupu veřejnosti k těmto technologiím. V případě úspěchu jaderné fúze by lidstvo získalo levný a dostupný zdroj energie, který by v případě rozumného využití mohl velkou měrou přispět ke zlepšení životních podmínek na planetě Zemi. Cesta k tomuto výsledku bude ale jistě dlouhá a plná překážek.

Přínos práce spočívá ve shrnutí poznatků z oblasti jaderných reaktorů a nastínění několika možností, jak by se do budoucna mohla jaderná energetika vyvíjet. Při tvorbě práce byla vytvořena schémata našich dvou jaderných elektráren a srovnány jejich nejdůležitější parametry.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Energie z jižních Čech*. ČEZ, 2009.
- [2] KLAUS, Václav a Daneš BURKET. *Jaderná energie: Útlum nebo rozvoj?* Institut Václava Klause, 2007. ISBN 978-80-87806-73-9.
- [3] *Fission: Nuclear Energy and Fission* [online]. 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://byjus.com/physics/what-is-nuclear-fission/>
- [4] *World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements* [online]. 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>
- [5] *Pokročilé jaderné technologie a skupina ČEZ*. ČEZ, 2008.
- [6] *Nuclear Power in the USA* [online]. 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx>
- [7] *Nuclear Power in France* [online]. 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>
- [8] *Japonské atomové elektrárny se pomalu a postupně vrací do provozu* [online]. 2015 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/japonsko-jaderna-elektrarna-d15-/tec_technika.aspx?c=A151026_145905_tec_technika_mla
- [9] *Energie z Vysočiny*. ČEZ, 2013.
- [10] JANOUC, František. *Myslím zeleně, proto volím jádro: (úvahy o energii a budoucnosti lidstva)*. Akropolis, 2011. ISBN 978-80-87806-73-9.
- [15] *Jak pracuje elektrárna* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.dukovany.cz/jak-pracuje-elektrarna.html>
- [12] Materiály ČEZ, Dukovany 2017
- [13] *Radioaktivní odpady a skupina ČEZ*. ČEZ, 2008.
- [14] *MOX – Jaderné palivo pro moderní reaktory* [online]. 2016 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/mox-palivo-ze-smesi-oxidu/>
- [15] *Nuclear Power Reactors* [online]. 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [16] *Oklo – jaderné reaktory z pravěku* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/cejnar/publikace/Oklo.htm>

- [17] BROMOVÁ, Edita, Dušan VARGONČÍK, Michael SOVADINA a Daniel FALTA. SIMOPT, s.r.o. *Jaderná energie a energetika* [online]. Simopt, 2013 [cit. 2014-05-11]. ISBN 978-80-87851-01-2. Dostupné z: <http://books.simopt.cz/cz/multimedialniknihy/jadroz-jaderna-energie-a-energetika>
- [18] *Reaktory III. generace* [online]. 2008 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/3531-reaktory-iii-generace.html>
- [19] *Vybavení první jaderné elektrárny* [online]. 2016 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/10/vybaveni-prvni-jaderne-elektrarny/>
- [20] *Generace jaderných reaktorů – jaké generace máme, čím se navzájem liší* [online]. 2016 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/03/generace-jadernych-reaktoru-jake-generace-mame-cim-se-navzajem-lisi/>
- [21] *Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice* [online]. 2007 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://proatom.luksoft.cz/view.php?cislocclanku=2007020401>
- [22] *Slovensko rozjede Jaslovské Bohunice. Kvůli plynové krizi* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: http://www.tyden.cz/rubriky/zahranici/evropa/slovensko-rozjede-jaslovske-bohunice-kvuli-plynove-krizi_99807.html
- [23] *Nuclear reactors* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://whatisnuclear.com/articles/nucreactor.html#types>
- [24] *USS Nautilus (SSN-571)* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Nautilus_\(SSN-571\)#cite_note-2](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Nautilus_(SSN-571)#cite_note-2)
- [25] *Energie bez kouře. Encyklopedie energie. ČEZ, 1998.*
- [26] *Proč Sověti stavěli černobylské reaktory a v čem byla chyba* [online]. 2016 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/chernobyl-havarie-0kx-/tec_technika.aspx?c=A160425_152556_tec_technika_mla
- [27] *Sodíkové reaktory I: Jak fungují nejúspěšnější rychlé reaktory?* [online]. 2013 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2013/04/sodikove-reaktory-i-jak-pracuji-nejvykonnejsi-rychle-reaktory-soucasnosti/>
- [28] *Odborník vysvětluje: Co přináší nově spuštěný množivý reaktor* [online]. 2014 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/mnozivy-rychly-reaktor-bn-800-dgc-/veda.aspx?c=A140708_132545_veda_mla
- [29] *Novovoronežská JE: První reaktor generace III+ na světě dodal do sítě první elektřinu. Komponenty pro něj vyrobily české firmy.* [online]. 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/08/novovoronezska-je-prvni-reaktor-generace-iii-na-svete-dodal-do-site-prvni-elektrinu-komponenty-pro-nej-vyrobily-ceske-firmy/>
- [30] *Otázky Václava Moravce* [online]. 12. 3. 2017 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/1126672097-otazky-vaclava-moravce/217411030510312-otazky-vaclava-moravce-2-cast/>

- [31] *Roční zpráva o provozu ES ČR*. Energetický regulační úřad [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/3769f65b-3789-4e93-be00-f84416e1ca03
- [32] *Jaderná energetika v České republice* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/je-v-cr.html>
- [33] *Daniel Beneš potvrdil záměr ČEZ vybudovat nové bloky v Dukovanech* [online]. 2012 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2012/05/daniel-benes-potvrdil-zamer-cez-vybudovat-nove-bloky-v-dukovanech/>
- [34] *ČEPS* [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx>
- [35] MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4349-5.
- [36] *Temelín loni vyrobil čtvrté největší množství elektřiny ve své historii. Dukovany nejméně za 17 let* [online]. 2016 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://byznys.ihned.cz/c1-65052390-temelin-loni-vyrobil-ctvrte-nejvetsi-mnozstvi-elektriny-ve-sve-historii-lepsimu-vysledku-zabranily-odstavky>
- [37] KISSLER, Martin. *Modernizace Jaderné elektrárny Dukovany*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [38] *Jaderná elektrárna Temelín – technický skvost z jižních Čech* [online]. 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-temelin-technicky-skvost-z-jiznich-cech/>
- [39] *Modernizace jaderných elektráren je finančně náročná* [online]. 2014 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.aktivnizona.cz/cs/clanky/modernizace-jadernych-elektraren-je-financne-narocna-1322.html>
- [40] MATĚJKA, Ondřej. *Porovnání tepelných oběhů jaderné a uhelné elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, 2016. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Stanislav Bouček
- [41] *Jaderná elektrárna Dukovany* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-dukovany>
- [42] *Jaderná elektrárna Temelín* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
- [43] *Technická data jaderných elektráren* [online]. 2001 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/Priloha1.pdf

- [44] *Temelín v lednu vyrobil rekordních 1,591 mld kWh elektřiny* [online]. 2015 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2015/02/temelin-v-lednu-vyrobil-rekordnich-1591-mld-kwh-elektriny/>
- [45] *Temelín pracuje na plný výkon* [online]. 2013 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.temelinky.cz/cs/clanky/temelin-pracuje-na-plny-vykon-308.html>
- [46] KOZÁK, Tomáš. *Termodynamika parního cyklu jaderných elektráren*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 52 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [47] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [48] *Jaderný reaktor na vašem PC, softwarový program* [online]. 2008 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-studenty/materialy-ke-studiu/pocitacove-programy/4.html>
- [49] Prezentace Letní univerzity, ČEZ, 2015
- [50] BRUNČIAKOVÁ, M. *Jaderné reaktory pro novou výstavbu v České republice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph. D.
- [51] *Technologie pro dostavbu Temelína* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin/technologie.html>
- [52] *Před rokem ČEZ zrušil tendr na dostavbu JE Temelín* [online]. 2015 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2015/04/pred-rokem-cez-zrusil-tendr-na-dostavbu-je-temelin/>
- [53] *Premiér Sobotka na návštěvě Jaderné elektrárny Temelín* [online]. 2015 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin/aktuality/49.html>
- [54] *Reaktory IV generace* [online]. 2008 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/3568-reaktory-iv-generace.html>
- [55] *Reaktory 4. generace – rychlé reaktory FNR a další* [online]. 2016 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/reaktory-4-generace-rychle-fnr-a-dalsi/>
- [56] *Generation IV Nuclear Reactors* [online]. 2016 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>
- [57] *Využití jaderné fúze* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/824-vyuziti-jaderne-fuze>

- [58] *Staveniště ITER letos v létě* [online]. 2016 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/1900-staveniste-iter-letos-v-lete>
- [59] *Rychlé jaderné reaktory a využití thoria v indické jaderné energetice* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/indiejadro.htm>
- [60] *Thorium jako zdroj energie?* [online]. 2015 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://pavelsuk.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=478789>
- [61] *Beta-minus decay* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/radioactivity#toc48274>
- [62] WAGNER, Vladimír. *Fukušima I poté*. Praha: Novela bohemia, 2015. ISBN 978-80-87683-45-3.
- [63] *Tři aspekty, ve kterých mohou malé modulární reaktory překonat současné bariéry jaderné energetiky* [online]. 2016 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/05/tri-aspekty-ve-kterych-mohou-male-modularni-reaktory-prekonat-soucasne-bariery-jaderne-energetiky/>
- [64] *Atomový reaktor do každé rodiny. Nebo aspoň města* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/modularni-atomove-reaktory>
- [65] *Elektrina a problém negativních cen* [online]. 2016 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/nazory/elektrina-problem-negativnich-cen/>

Seznam použitých zkratk a symbolů

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
ADS	Accelerator-Driven System
AGR	Advanced Gas-Cooled Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANada Deuterium-Uranium
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
EBWR	Experimental Boiling Water Reactor
EPR	European Pressurized Reactor
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
FBR	Fast Breeder Reactor
FR	Fast Reactor
GCR	Gas Cooled Reactor
GFR	Gas-cooled Fast Reactor
HTGR	High-Temperature Gas-cooled Reactor
HWGCR	Heavy Water Gas Cooled Reactor
LFR	Lead-cooled Fast Reactor
MIR	Modernized International Reactor
MOX	Mixed OXide
MSR	Molten Salt Reactors
PHWR	Pressurized Heavy-Water Reactor
PLWBR	Pressurized Light-Water Breeder Reactor
PWR	Pressurized Water Reactor
RBMK	Реактор Большой Мощности Канальный
SCWR	Supercritical-Water-cooled Reactor
SFR	Sodium-cooled Fast Reactor
VVER	Водо-Водяной Энергетический Реактор

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Jeden z možných výsledků štěpení jádra uranu neutronem [3].....	12
Obr. 2 Uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [11]	13
Obr. 3 Přehled jednotlivých generací jaderných reaktorů [18]	16
Obr. 4 Schéma PWR [17]	19
Obr. 5 Schéma BWR [17]	20
Obr. 6 Schéma PHWR [17]	21
Obr. 7 Schéma GCR (Magnox) [17]	22
Obr. 8 Schéma RBMK [17]	23
Obr. 9 Schéma FR [17]	24
Obr. 10 Umístění jaderných elektráren v ČR.....	27
Obr. 11 Český energetický mix – výroba elektrické energie v roce 2015 [30]	27
Obr. 12 Letecký pohled na Dukovany [33]	28
Obr. 13 Tlaková nádoba reaktoru VVER 440 [35].....	29
Obr. 14 Aktivní zóna dukovanského reaktoru [9].....	30
Obr. 15 Schéma dukovanské elektrárny s parametry vody a páry v oběhu [37], [Tab. 9]	30
Obr. 16 Letecký pohled na Temelín [38]	31
Obr. 17 Tlaková nádoba reaktoru VVER 1000 [35].....	32
Obr. 18 Schéma temelínské elektrárny s parametry vody a páry v oběhu [40], [Tab. 9]	32
Obr. 19 Zjednodušené schéma sekundárního okruhu JE Temelín [48].....	34
Obr. 20 Parogenerátor JE Temelín [48]	35
Obr. 21 T-s diagram parního cyklu elektrárny Dukovany [49]	36
Obr. 22 T-s diagram parního cyklu elektrárny Temelín [40]	37
Obr. 23 Schéma HTGR [17]	40
Obr. 24 Schéma termojaderné elektrárny [5]	42
Obr. 25 Transmutace radioaktivního odpadu technologií ADS [5]	43
Obr. 26 Reaktor Toshiba 4S [64].....	45
Tab. 1 Přehled používaných reaktorů ke konci roku 2014 [15]	15
Tab. 2 Typické parametry reaktoru VVER-1000 [25]	19
Tab. 3 Typické parametry reaktoru BWR s výkonem 1000 MWe [25]	20
Tab. 4 Typické parametry reaktoru CANDU s výkonem 600 MWe [25]	21
Tab. 5 Typické parametry reaktoru Magnox s výkonem 600 MWe [25].....	22
Tab. 6 Typické parametry reaktoru AGR s výkonem 600 MWe [25]	22
Tab. 7 Typické parametry reaktoru RBMK s výkonem 1000 MWe [25]	23
Tab. 8 Typické parametry reaktoru FBR s výkonem 1300 MWe [25].....	24
Tab. 9 Srovnání parametrů Dukovan a Temelína [9], [41], [42], [43], [44], [45].....	33